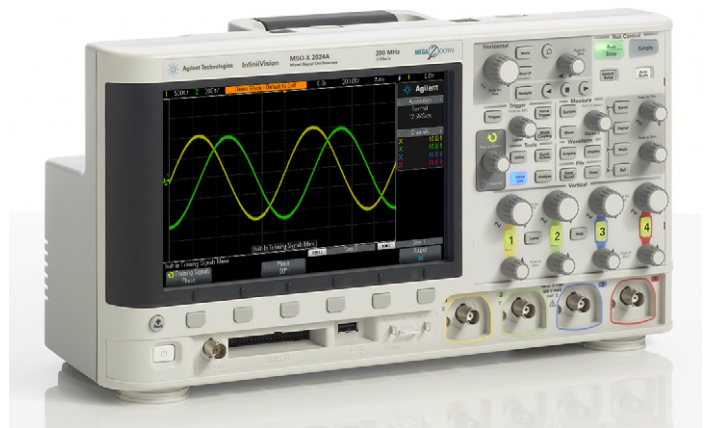


DSOXEDK教育用オシロス コープ・トレーニング・ キット



電気工学科／物理学科の学生向け
ラボ・ガイド／チュートリアル



Agilent Technologies

ご注意

© Agilent Technologies, Inc. 2008-2011

この手順書の全部または一部の転載、加工、配布は、Agilent製品に対する学生トレーニングの目的に対して許可されています。

商標

Microsoft®、MS-DOS®、Windows®、Windows 2000®、Windows XP® は、Microsoft Corporationの登録商標です。

Adobe®、Acrobat®、Acrobatロゴ® は、Adobe Systems Incorporatedの登録商標です。

マニュアル番号

75010-97001

版

2011年1月11日

電子フォーマットでのみ利用可能

Agilent Technologies, Inc.
1900 Garden of the Gods Road
Colorado Springs, CO 80907 USA

保証

本書の内容は「現状のまま」で提供されており、将来の版では予告なしに変更される可能性があります。また、該当する法律の許す限りにおいて、本書およびそのすべての内容について、Agilentは明示、暗黙を問わずいかなる保証もしていません。特に、商品性および特定目的への適合性に関して保証するものではありません。本書の内容の誤り、および本書の使用に伴う偶然、必然を問わずあらゆる損害に対して、Agilentは責任を負いかねます。Agilentとユーザとの間に本書の内容を対象とした保証に関する書面による契約が別に存在し、その内容がここに記す条件と矛盾する場合は、別契約の保証条件が優先するものとします。

テクノロジー・ライセンス

本書に記載されているハードウェアおよびソフトウェアはライセンスに基づいて提供されており、使用および複製にあたってはライセンスの条件を守る必要があります。

権利の制限について

ソフトウェアが米国政府の主契約または下請けによって使用される場合、ソフトウェアは、DFAR 252.227-7014（1995年6月）に定義されたCommercial computer software、またはFAR 2.101(a)に定義されたcommercial item、またはFAR 52.227-19（1987年6月）またはそれに相当する官庁規則または契約条項に定義されたRestricted computer softwareとして提供され、ライセンスされます。ソフトウェアの使用、複製、公開は、Agilent Technologiesの標準商用ライセンス条件に従って行われる必要があり、米国政

府の国防省以外の機関の権利は、FAR 52.227-19(c)(1-2)（1987年6月）に定義されたRestricted Rightsを超えることはありません。あらゆる技術データに関する米国政府のユーザの権利は、FAR 52.227-14（1987年6月）またはDFAR 252.227-7015 (b)(2)（1995年11月）に定義されたLimited Rightsを超えることはありません。

安全に関する注意事項

注意

注意の表記は危険を表します。ここに記載された操作手順、心得などを正しく実行または遵守しない場合は、製品の損傷や重要なデータの損失を招くおそれがあります。記載された指示を十分に理解し、それが守られていることを確認しない限り、注意の指示より先に進まないでください。

警告

警告の表記は危険を表します。ここに記載された操作手順、心得などを正しく実行または遵守しない場合は、怪我や人命の損失を招くおそれがあります。記載された指示を十分に理解し、それが守られていることを確認しない限り、警告の指示より先に進まないでください。

ラボ・ガイド／チュートリアル の概要

このオシロスコープ・ラボ・ガイド／チュートリアルは、教育用トレーニング・キット (DSOXEDK) と Agilent Technologies InfiniiVision 2000/3000 Xシリーズ オシロスコープ (DSO/MSOモデル) 用です。

教授の皆さんへの注記

教授およびラボ担当教員各位

このオシロスコープ・ラボ・ガイド／チュートリアルは15種類のハンズオン・ラボから構成され、終了すれば、オシロスコープおよびオシロスコープの使用方法を理解できるようになります。オシロスコープは、使用される頻度が、他の測定器よりも高い測定ツールです。学生たちは、卒業して今日のエレクトロニクス産業界に入った後も、さまざまな分野でオシロスコープを使用します。このため、このツールをうまく使いこなせるようになることが極めて重要です。

15種類のラボはそれぞれ、約15～20分かかります。これらのラボでは、教育者用トレーニング・キット・オプション (DSOXEDK) と Agilent の InfiniiVision 2000/3000 X シリーズ オシロスコープを使用します。教育者用トレーニング・キット・オプションでは、特に電気工学／物理学専攻の学生向けにデザインされたさまざまな内蔵トレーニング信号を使用できます。トレーニング信号の中には非常に単純なものもあれば (正弦波など)、実環境のアナログ信号やデジタル信号のように非常に複雑なものもあります。オシロスコープ、2本のパッシブ・プローブ (オシロスコープに標準で付属)、1本のBNCケーブル以外に必要なテスト機器はありません。

最初の回路ラボで実験課題のテストを開始する前に、本書の第1章、付録A、付録Bを読んで予習 (下調べ) しておくことをお勧めします。第1章では、プロービングの基本はもちろん、オシロスコープの概要を紹介します。付録Aと付録Bは、オシロスコープの動作原理と帯域幅に関する短いチュートリアルです。

最初のラボ・セッションで、本書の第2章 (基本的なオシロスコープ/WaveGen測定ラボ) の6つのハンズオン・ラボを終了してください。ラボ#1～#3では、オシロスコープのスケーリング (V/div および s/div) を設定したり、エッジ・トリガを使用するのに十分な知識が得られ、初期のラボでの実験課題で基本的なオシロスコープ測定が行えます。ラボ#4では、必要に応じて測定結果をレポートに含めることができるように、測定結果を保存する方法を教えます。ラボ#5では、プローブ補正の調整方法を学ぶことができます。また、ラボ#6では、WaveGen内蔵ファンクション・ジェネレータ (オプション) の使用方法を教えます。このラボは約5分間で終了できますが、オシロスコープには、このオプションがライセンスされている必要があります。

本書の第3章で紹介する「高度な」ハンズオン・オシロスコープ・ラボはオプションです。オシロスコープのより高度な測定機能の使用方法をより詳しく学んでみたいと思う学生は、これらのラボを部分的に行うことも、すべて行うこともできます。教授が重要と判断するラボを行うように学生に指示することも可能です。このラボ・ガイドは、柔軟に使用できるように構成されています。

敬具



Johnnie Hancock

オシロスコープ教育プログラム・マネージャ

Agilent Technologies

目次

ラボ・ガイド／チュートリアル の概要 3

教授の皆さんへの注記 4

1 測定前の準備

プローブの接続 8

フロント・パネルの概要 11

2 基本的なオシロスコープ/WaveGen測定ラボ

ラボ#1：正弦波の測定 16

ラボ#2：オシロスコープのトリガの基礎 22

ラボ#3：ノイズの大きな信号でのトリガ 28

ラボ#4：オシロスコープのテスト結果の記録／保存 32

ラボ#5：10:1パッシブ・プローブの補正 37

適切な容量性補正の計算 40

プローブの負荷 41

ラボ#6：WaveGen内蔵ファンクション・ジェネレータの使用方法 43

3 高度なオシロスコープ測定ラボ

ラボ#7：トリガ・ホールドオフを使用したデジタル・バーストでのトリガ 46

ラボ#8：発生頻度の少ないイベントでのトリガ、捕捉、解析 50

ラボ#9：シングルショット・イベントの捕捉 54

ラボ#10：デジタル波形の自動パラメトリック測定 57

ラボ#11：オシロスコープのズーム・タイムベースを使用したゲーテッド測定 63

ラボ#12：位相遅延測定とリサージュ波形 67

ラボ#13：オシロスコープの波形演算の使用方法 71

ラボ#14：アンダーサンプリングに対応するためのピーク検出 75

ラボ#15：セグメント・メモリを使用したより多くの波形の捕捉 78

4 まとめ

Agilentの関連カタログ 84

A オシロスコープのブロック図と動作原理

DSOのブロック図 86

ADCブロック 86

アッテネータ・ブロック 87

DCオフセット・ブロック 87

増幅器ブロック 87

トリガ・コンパレータ・ブロックとトリガ・ロジック・ブロック 88

タイムベース・ブロックと捕捉メモリ・ブロック 89

Display DSPブロック 90

B オシロスコープの帯域幅に関するチュートリアル

オシロスコープの帯域幅の定義 91

アナログ・アプリケーションに必要な帯域幅 92

デジタル・アプリケーションに必要な帯域幅 93

経験則 94

ステップ1：実際の最高速のエッジ速度の測定 94

ステップ2： f_{knee} の計算 94

ステップ3：オシロスコープ帯域幅の計算 95

例 95

デジタル・クロック測定の比較 96

索引

1 測定前の準備

プローブの接続 8

フロント・パネルの概要 11

オシロスコープは、最新のアナログ／デジタル電気回路で電圧／タイミング測定を行うための重要なツールです。電気工学科を卒業してエレクトロニクス業界に入れば、デザインのテスト／検証／デバッグに、測定ツールとしてオシロスコープがどの測定器よりも頻繁に使用されていることがわかります。大学でも、オシロスコープは、さまざまな回路ラボで実験課題やデザインをテスト／検証するために最も頻繁に使用される測定ツールです。しかし、多くの学生が、オシロスコープの使用方法を十分に理解していません。多くの場合、求めているものに近い画像がオシロスコープのディスプレイ上に表示されるまで、ノブをランダムに回してボタンを押すというのが、学生たちのやり方です。この一連の短いラボの終了後には、オシロスコープやオシロスコープのより効率的な使用方法を理解できるはずですが。

それでは、オシロスコープとはどのようなもののでしょうか？オシロスコープは、入力信号に影響を与えることなくそれをモニタし、電圧対時間のフォーマットでグラフィック表示する電子計測器です。教授が学生時代に使用していたこの種のオシロスコープは通常、アナログ・テクノロジーだけに基いたものでした。これらの旧世代のオシロスコープは、通常はアナログ・オシロスコープと呼ばれ、帯域幅が制限され（付録Bを参照）、自動測定機能がなく、入力信号が繰り返し信号（連続的に発生し、繰り返す入力信号）である必要もありました。

この一連のラボだけでなく、この他の大学での研究にも間違いなく使用されるオシロスコープのタイプはデジタル・ストレージ・オシロスコープであり、DSOと簡単に呼ばれることもあります。また、従来のDSO測定機能とロジック解析測定機能を兼ね備えたミックスド・シグナル・オシロスコープ（MSOとも呼ばれることもある）を使用する場合があります。今日のDSOやMSOは、繰り返し信号やシングルショット信号を捕捉して表示することができます。また、通常は、さまざまな自動測定／解析機能を内蔵し、教授が学生時代だった頃よりもすばやく正確に、デザインや学生実験を評価できるはずですが。



1 測定前の準備

オシロスコープの基本については、Agilentのアプリケーション・ノート『オシロスコープの基礎』（カタログ番号：5989-8064JAJP）をダウンロードしてください。このカタログは、本書の「[Agilentの関連カタログ](#)」に、ダウンロード方法とともに掲載されています。オシロスコープの動作理論を主に学びたいという場合は、本書の付録Aを参照してください。

オシロスコープの使用方法を短時間で学んで、オシロスコープの機能を理解するための最良の方法は、オシロスコープの最も重要なコントロールをまずいくつか習得してから、正弦波などの基本信号を測定することです。DSOXEDK教育者用トレーニング・キット・オプションがライセンスされているAgilent InfiniiVision 2000/3000 Xシリーズオシロスコープは、[図1](#)に示すように、さまざまなアナログ/デジタル・トレーニング信号を作成できます。これらの信号の多くは、一連のラボで使用して、オシロスコープの使用法の習得に使用します。

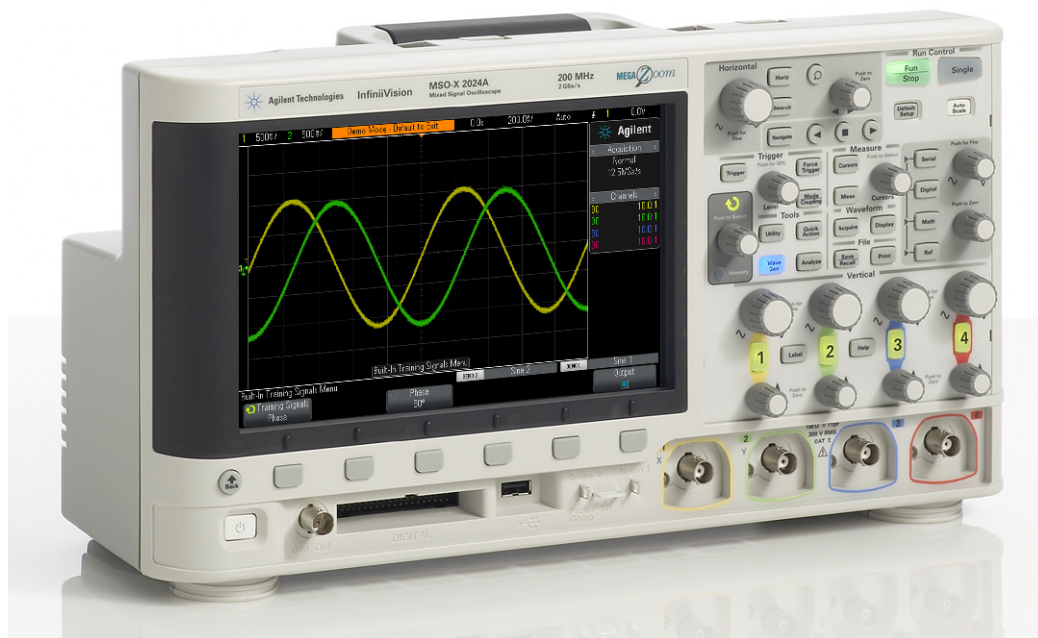


図1 Agilent InfiniiVision 2000/3000 Xシリーズ オシロスコープ

プローブの接続

オシロスコープ測定を行う際の最初の作業は、被試験デバイスとオシロスコープの入力BNCの間にプローブを接続することです。オシロスコープ・プローブは、テスト・ポイントを比較的高い入力インピーダンス（高抵抗、低キャパシタンス）で終端します。オシロスコープやオシロスコープ・プローブによって被試験信号の特性を変化させたくないため、測定器を被試験回路から分離するために、高インピーダンス接続が重要です。

測定に使用されるオシロスコープ・プローブにはさまざまなタイプがありますが、これから使用するプローブは、最も一般的なタイプのプローブで、**10:1**パッシブ電圧プローブと呼ばれます（[図2](#)を参照）。「パッシブ」とは単に、このタイプのプローブには、トランジスタや増幅器などの「アクティブ」コンポーネントが全く含まれていないことを意味します。「10:1」とは、このプローブがオシロスコープの入力で受信された入力信号を10分の1に減衰することを意味します。

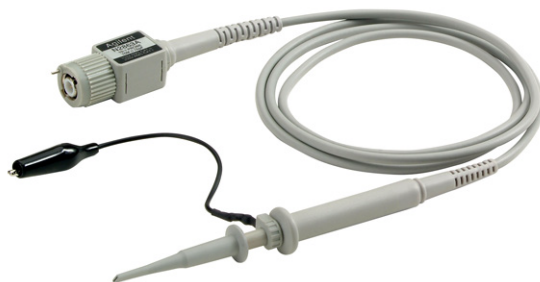


図2 10:1パッシブ電圧プローブ

標準の10:1パッシブ・プローブを使用する場合、すべてのオシロスコープ測定を信号テスト・ポイントとグランドの間で実行する必要があります。すなわち、オシロスコープのグランド・クリップをグランドに接続しなければなりません。このタイプのプローブを使用して、回路内の中間にあるコンポーネントの電圧を測定することは**できません**。グランドに接続されていないコンポーネントの電圧を測定する必要がある場合は、オシロスコープの2つのチャンネルを使用してコンポーネントの両端でグランドに対する信号を測定しながら、オシロスコープの減算機能（ラボ#13で説明）を使用するか、特殊な差動アクティブ・プローブを使用します。また、オシロスコープを使用して回路を形成することはしないでください。

[図3](#)は、オシロスコープの1 M Ω のデフォルト入力を選択してオシロスコープに接続した場合の10:1パッシブ・プローブの電気的モデルを示したもので、このタイプのプローブを使用する場合に必要になります。また多くの広帯域オシロスコープでは、50 Ω 入力を選択することもでき、アクティブ・プローブの終端や、50 Ω BNC同軸ケーブルを使って50 Ω 信号源から直接信号を入力する場合に使用します。

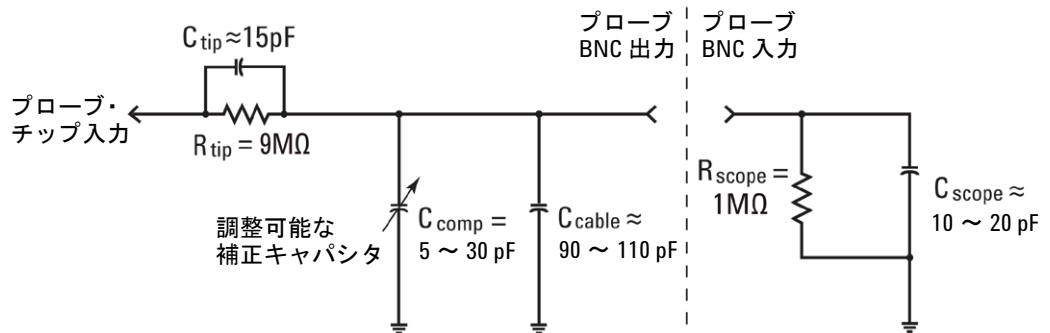


図3 オシロスコープの1 MΩ入力インピーダンスに接続された10:1パッシブ・プローブの簡略化した回路図

パッシブ・プローブ/オシロスコープの電気的モデルには、意図的にデザインされた補正キャパシタンス回路だけでなく、固有の容量や寄生容量も含まれていますが（デザインされたものではありません）、差し当たってはこれらの容量性素子を無視して、このプローブ/オシロスコープ・システムの理想的な信号動作を低周波条件またはDC入力条件で解析します。

プローブ/オシロスコープの電気的モデルから容量性素子をすべて取り除いた後に残るのは、オシロスコープの1 MΩ入力インピーダンスに直列接続された9 MΩプローブ・チップ抵抗だけです。このため、プローブ・チップの実入力抵抗は10 MΩになります。オームの法則を使用すれば、オシロスコープの入力の電圧レベルがプローブ・チップの電圧レベルの1/10になることがわかります ($V_{\text{scope}} = V_{\text{probe}} \times (1 \text{ M}\Omega / 10 \text{ M}\Omega)$)。

すなわち、10:1パッシブ・プローブでは、オシロスコープ測定システムのダイナミック・レンジが拡大されます。言い換えると、1:1プローブで測定できる信号と比べて、10倍の振幅を持つ信号を測定できます。さらに、オシロスコープ測定システム（プローブ+オシロスコープ）の入力インピーダンスが、1 MΩから10 MΩに増加します。入力インピーダンスが低いと被試験デバイス（DUT）に負荷がかかり、DUT内の実際の電圧レベルが変化する可能性（良くないこと）があります。さらに、10 MΩの実入力インピーダンスは確かに大きいですが、プロービングするデバイスのインピーダンスと関連付けて、この負荷インピーダンス量を考慮する必要があることを忘れないでください。例えば、単純なオペアンプ回路に100 MΩフィードバック抵抗を使用すれば、オシロスコープの読み値に誤りが生じる場合があります。

回路ラボでAgilent 3000 Xシリーズ オシロスコープを使用している場合は、このオシロスコープは、プローブの減衰比を自動的に検出して、10:1に設定します。Agilent 2000 Xシリーズ オシロスコープを使用している場合は、プローブの減衰比（10:1）を手動で入力する必要があります。オシロスコープは、（自動検出した、または手動入力された）プローブの減衰比が設定されれば、プローブ・チップにおいて減衰していない入力信号を基準にしてすべての電圧が測定されるように、すべての垂直設定に対して補正された値を表示します。例えば、10 Vpp信号をプロービングした場合は、オシロスコープの入力で実際に受信される信号はわずか1 Vppですが、オシロスコープは、10:1プローブが使用されていることを認識しているので、電圧測定時には、10 Vpp信号が検出されると表示します。

ラボ#5 (10:1パッシブ・プローブの補正) で、再びこのパッシブ・プローブ・モデルに戻って、容量性コンポーネントに取り組むこととなります。プローブ/オシロスコープ電氣的モデルのこれらの要素は、オシロスコープ/プロービング・システムのダイナミック/AC性能に影響を与えます。

フロント・パネルの概要

最初に、オシロスコープの最も重要なコントロール/ノブの操作に慣れることから始めます。オシロスコープの上部付近には、“Horizontal (水平軸)”コントロールがありません (図4を参照)。大きい方のノブは、水平軸スケーリングをs/div単位で設定します。このコントロールは、表示波形のX軸スケーリングを設定します。水平軸の1 divは、各垂直軸グリッド・ライン間の Δ 時間です。より高速の波形 (より高い周波数の信号) を表示したい場合は、水平軸スケーリングをより小さいs/div値に設定します。より低速の波形 (より低い周波数の信号) を表示したい場合は、水平軸スケーリングをより大きなs/div値に設定します。Horizontal (水平軸) セクションの小さい方のノブは、波形の水平軸の位置を設定します。すなわち、このコントロールでは、波形の水平位置を左右に移動できます。オシロスコープの水平軸コントロール (s/divおよび位置) は通常、オシロスコープのメイン・タイムベース・コントロールと呼ばれます。



図4 オシロスコープの水平軸 (X軸) コントロール

オシロスコープの下部付近のVerticalセクション (入力BNCのすぐ上) にあるコントロール/ノブは (図5を参照)、オシロスコープの垂直軸スケーリングを設定します。2チャンネル・オシロスコープを使用している場合は、垂直軸スケーリング・コントロールが2組あります。4チャンネル・オシロスコープを使用している場合は、垂直軸スケーリング・コントロールが4組あります。Verticalセクションにある各入力チャンネルの大きい方のノブは、垂直軸スケーリング係数をV/div単位で設定します。これは、波形のY軸スケーリングです。垂直軸の1 divは、各水平軸グリッド・ライン間の Δ 電圧です。比較的大きな信号 (高いp-p電圧) を表示したい場合は通常、V/div設定を大きな値に設定します。小レベルの入力信号を表示する場合は、V/div設定を小さな値に設定します。Verticalセクションにある各チャンネルの小さい方のコントロール/ノブは、位置/オフセット・コントロールです。このノブを使用して、波形を画面上で上下に移動できます。

1 測定前の準備



図5 オシロスコープの垂直軸（Y軸）コントロール

もう1つの非常に重要なオシロスコープの設定変数は、トリガ・レベル・コントロール／ノブです（図6を参照）。このコントロール・ノブは、オシロスコープのフロント・パネルの中央付近、**Trigger**セクションのすぐ下にあります。トリガは、最も理解し難いオシロスコープ機能ですが、理解する必要がある最も重要な機能の1つです。オシロスコープのトリガ機能については、ハンズオン・ラボで詳細に説明します。



図6 オシロスコープのトリガ・レベル・コントロール

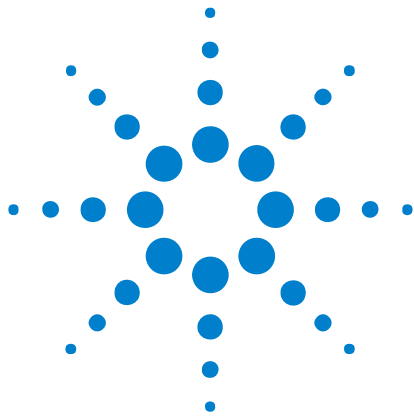
以下のラボの手順を読むと必ず、かぎ括弧内に太字で単語（**[Help]**など）が示されていますが、これは、オシロスコープの右側にあるフロントパネル・キーを意味します。キーを押せば、固有のメニューが起動して、その特定のフロント・パネル機能に関連する「ソフトキー」の選択肢が表示されます。「ソフトキー」とは、オシロスコープのディスプレイの下にある6個のキー／ボタンです。これらのキーの機能は、起動されたメニューによって変わります。

次に、**Entry**コントロール・ノブの位置を確認します（図7を参照）。これは、オシロスコープのディスプレイのすぐ右側の濃い陰影領域にあるノブです。このノブは、専用のフロントパネル・コントロールがない各種設定変数／選択を変更するのに非常に頻繁に使用します。ソフトキー選択の丸くなった緑色の矢印（↻）は、**Entry**ノブによってこの変数が制御されることを示しています。このノブは波形の輝度レベルの設定にも使用されます。それでは、オシロスコープで測定を開始しましょう。



図7 オシロスコープの汎用入力コントロール

1 測定前の準備



2 基本的なオシロスコープ/WaveGen 測定ラボ

- ラボ#1 : 正弦波の測定 16
- ラボ#2 : オシロスコープのトリガの基礎 22
- ラボ#3 : ノイズの大きな信号でのトリガ 28
- ラボ#4 : オシロスコープのテスト結果の記録／保存 32
- ラボ#5 : 10:1パッシブ・プローブの補正 37
- ラボ#6 : WaveGen内蔵ファンクション・ジェネレータの使用法 43

ラボ#1：正弦波の測定

この最初のラボでは、正弦波（繰り返し波形）を表示するようにオシロスコープを正しく設定するために、オシロスコープの水平軸／垂直軸スケーリング・コントロールの使用方法を学びます。さらに、この信号のいくつかの簡単な電圧／タイミングの測定方法も学びます。

- 1 図8のように、チャンネル1入力BNCと“Demo1”端子を1本のオシロスコープ・プローブで接続します。このプローブのグランド・クリップを中央端子（グランド）に接続します。

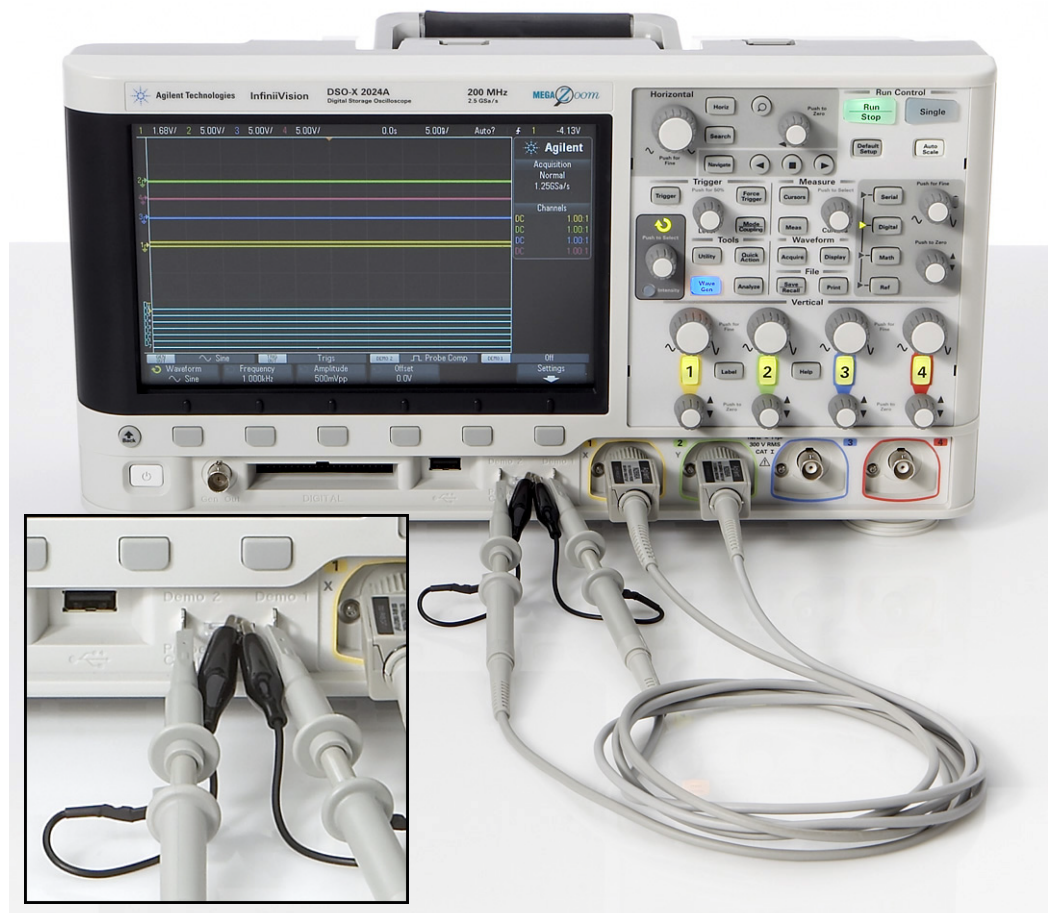


図8 チャンネル1/チャンネル2入力とトレーニング信号の出力端子間のプローブの接続

- 2 図8のように、チャンネル2の入力BNCと“Demo2”端子をもう1本のオシロスコープ・プローブで接続します。このプローブのグランド・クリップを中央端子に接続します。
- 3 フロント・パネルの右上にある[Default Setup]キーを押します。

Default Setupは、オシロスコープを工場出荷時のプリセット状態に戻します。これにより、オシロスコープのX/Yスケーリング係数がプリセット値に設定されるだけでなく、学生仲間の一人が使用した可能性のある特殊な動作モードはすべてオフになります。

- 4 **[Help]** フロントパネル・キー（チャンネル2の垂直軸コントロールの近くにある）を押します。
- 5 オシロスコープのディスプレイの下にある**Training Signals**（トレーニング信号）ソフトキーを押します。
- 6 **Entry** ノブを使って**Sine**（正弦波）信号（リストの最上行）を選択し、**Output**（出力）ソフトキーを押してオンにします。

Demo1端子には現在正弦波が存在しているはずですが、オシロスコープのデフォルトのスケーリング係数を使って認識することはまだできません。今度は、オシロスコープの垂直軸/水平軸の設定を調整して、ディスプレイの中央にこの波形を拡大表示します。

- 7 画面の $\frac{1}{2}$ 以上に波形が表示されるまで、チャンネル1のV/divノブを時計回りに回します。適切な設定は**500 mV/div**で、ディスプレイの左上に“500mV/”と表示されます。
- 8 ディスプレイに正弦波が2周期以上表示されるまで、s/divノブ（Horizontal（水平軸）セクションの大きいノブ）を時計回りに回します。適切な設定は**50 ns/div**で、ディスプレイの上部中央付近に“50.00ns/”と表示されます。オシロスコープのディスプレイには、図9のような画面が表示されているはずです。今後はこれを、「タイムベース」設定と呼びます。

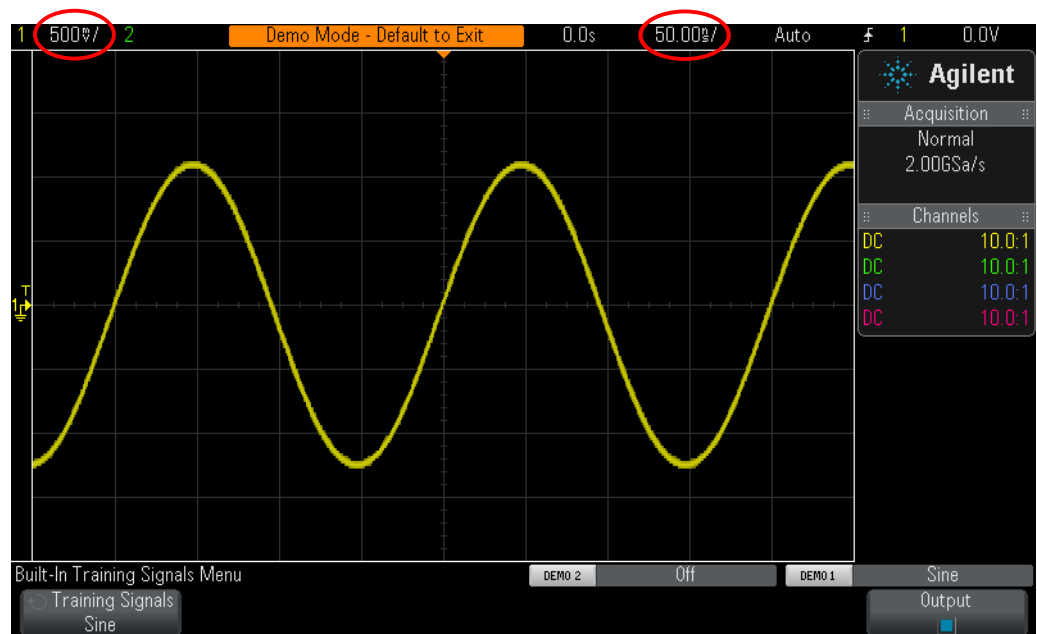


図9 正弦波トレーニング信号を表示するための初期設定

2 基本的なオシロスコープ/WaveGen測定ラボ

- 9 水平位置ノブを回して、波形を左右に移動します。
- 10 水平位置ノブを押して、ゼロ（画面中央を0.0 s）に戻します。
- 11 チャンネル1の垂直位置ノブを回して、波形を上下に移動します。左側のグラウンド・インジケータも上下に移動し、0.0 V（グラウンド・レベル）がこの波形上のどの位置にあるかがわかります。
- 12 チャンネル1の垂直位置ノブを押して、グラウンド（0.0 V）を画面中央に戻します。

今度は、この繰り返し正弦波のパラメータを測定します。オシロスコープの表示は、基本的にはX対Yグラフです。X軸（水平軸）では時間を、Y軸（垂直軸）では電圧を測定できます。授業の課題では通常、電気信号を計算して紙の上でグラフ化してきたか、さまざまなPCソフトウェアを使って、波形を自動的にグラフ化してきたことでしょう。入力信号（繰り返し波形）をオシロスコープに印加すれば、波形の動的な（連続更新）グラフをモニタできます。

画面のX軸には10刻みで大目盛りが付けられていて、各大目盛りはs/div設定と同じです。前述のように、オシロスコープのタイムベースが50.0 ns/divに設定されていれば、各水平方向の大目盛りは50 nsです。画面には10個の目盛りが付けられているため、オシロスコープのディスプレイの左側から右側までの表示時間は、500 ns（50.0 ns/div × 10 div）です。各大目盛りはまた4つの小目盛りに分割され、中央の横軸にチック・マークで表示されています。各小目盛りは、 $1/4 \text{ div} \times 50 \text{ ns/div} = 12.5 \text{ ns}$ に相当します。

Y軸には垂直方向に8個の大目盛りが付けられていて、各大目盛りはV/div設定と同じです。V/div設定は500 mV/divに設定します。この設定では、オシロスコープは、4 Vp-p（500 mV/div × 8 div）の信号を測定できます。各大目盛りは5個の小目盛りに分割されています。各小目盛りは、中央の横軸にチック・マークで表示され、それぞれ100 mVに相当します。

- 13 0.0 Vレベルの立ち上がりエッジ（画面中央）から次の0.0 Vレベルの立ち上がりエッジまでの目盛りの数を数えて、s/div設定（50.0 ns/div）を乗算し、これらの正弦波の1つの周期（T）を計算します。

$$T = \underline{\hspace{2cm}}$$

- 14 この正弦波の周波数はいくつですか（ $F=1/T$ ）？

$$F = \underline{\hspace{2cm}}$$

次に、これらの正弦波のp-p電圧レベルを計算しますが、まず、この測定をより正確に行うために、垂直軸設定を少し調整します。

- 15 正弦波の負のピークがメジャー・グリッド（グリッド・ライン）の1つと交差するまで、チャンネル1の垂直位置ノブ（点灯している“1”キーの下にある小さなノブ）を調整します。
- 16 次に、正弦波の正のピークが小目盛りのチック・マークが表示されている中央の垂直軸と交差するまで、水平位置ノブ（フロント・パネルの上部付近にある小さなノブ）を調整します。
- 17 今度は、この正弦波の負のピークから正のピークまでの（大小）の目盛りの数を数えて、V/div設定（1 V/div）を乗算し、正弦波のp-p電圧を計算します。

$$V_{p-p} = \underline{\hspace{2cm}}$$

次に、オシロスコープの「カーソル」機能を使って、同じ電圧測定やタイミング測定を行います。ただし、目盛りを数えて、スケール係数を乗算する必要はありません。まず、フロント・パネルのMeasure（測定）セクションにある“Cursors（カーソル）”ノブの位置を目で確認します（[図10](#)を参照）。



図10 測定用のCursorsノブ

- 18 Cursors（カーソル）ノブを押し、“X1”が強調表示されるまで回し、もう一度押して選択します（“X1”カーソルまで回した後でノブをもう一度押さないと、タイムアウトが発生し、X1カーソルが自動的に選択され、メニューがクローズします）。
- 19 X1カーソル（#1タイミング・マーカ）が特定の電圧レベルで正弦波の立ち上がりエッジと交差するまで、Cursors（カーソル）ノブを回します。
ヒント：水平グリッド・ラインの1本と交差する波形上のポイントにカーソルを合わせます。
- 20 Cursors（カーソル）ノブを再度押し、“X2”が強調表示されるまで回し、もう一度押して選択します。
- 21 X2カーソル（#2タイミング・マーカ）が同じ電圧レベルで正弦波の次の立ち上がりエッジと交差するまで、Cursors（カーソル）ノブを回します。
- 22 Cursors（カーソル）ノブを再度押し、“Y1”が強調表示されるまで回し、もう一度押して選択します。

2 基本的なオシロスコープ/WaveGen測定ラボ

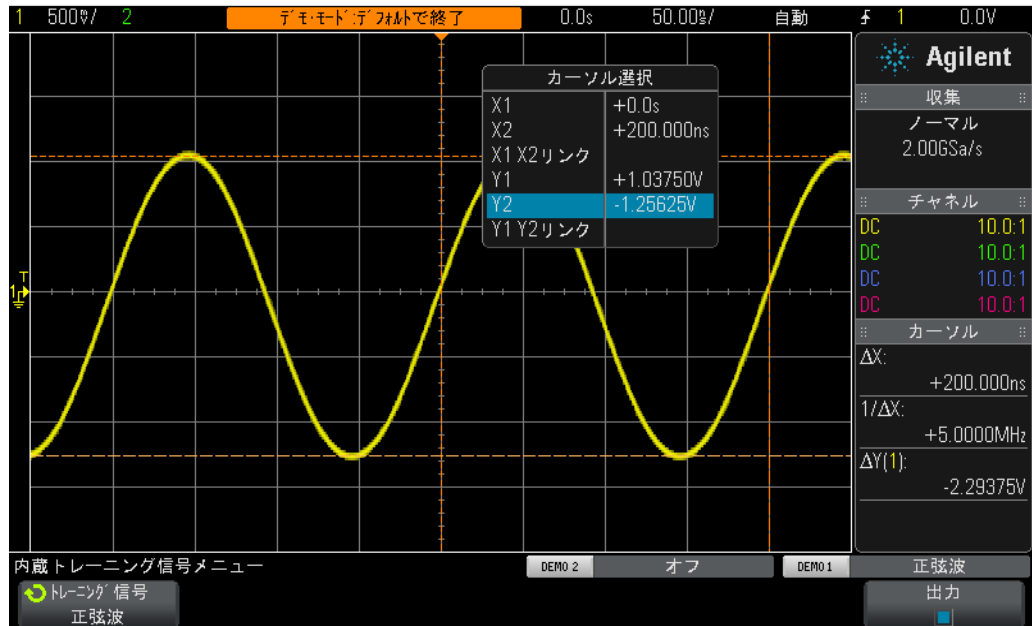


図11 オシロスコープのカーソル測定の使用方法

- 23 Y1カーソル（#1電圧マーカ）が正弦波の負のピークと交差するまで、Cursors（カーソル）ノブを回します。
- 24 Cursors（カーソル）ノブを再度押し、“Y2”が強調表示されるまで回し、もう一度押しして選択します。
- 25 Y2カーソル（#2電圧マーカ）が正弦波の正のピークと交差するまで、Cursors（カーソル）ノブを回します。
- 26 この信号の周期、周波数、p-p電圧はいくつですか（カーソル読み値はディスプレイの右側に表示されています）？

$$\Delta X = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$1/\Delta X = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$\Delta Y(1) = \underline{\hspace{2cm}}$$

オシロスコープで時間／電圧の測定に使用される最も一般的な方法は、最初に使用した「目盛りを数える」方法です。目盛りを数えてオシロスコープの設定値を乗算しなければなりません。オシロスコープの操作に慣れたエンジニアであれば、信号の電圧／タイミング・パラメータをすぐに評価できます。概算だけで、信号が有効かどうか分かる場合もあります。

カーソルを使用した場合は、測定確度が向上し、測定からの推定を排除できます。また今日のオシロスコープでは、ほとんどの場合、多くのパラメトリック測定をさらに正確かつ高速に自動実行できます。ラボ#10のデジタル信号の測定で、オシロスコープの自動パラメトリック測定の使用方法を再度取り上げます。ここでは、その前に、オシロスコープのトリガについて学びます。

ラボ#2 : オシロスコープのトリガの基礎

前述のように、オシロスコープのトリガは、オシロスコープ測定を最大限に活用するために理解しておく必要のあるオシロスコープの最も重要な機能であることは間違いありません。今日の複雑化するデジタル信号を測定する場合には特に、この機能は重要です。しかし、多くの場合、オシロスコープのトリガは最も難しい機能のひとつです。

オシロスコープの「トリガ」は「同期した写真撮影」だと考えることができます。オシロスコープは、1つの繰り返し入力信号の捕捉/表示に、1秒間に何万枚もの入力信号の写真を撮影することがあります。これらの波形（写真）を表示するには、写真撮影を「何か」と同期させる必要があります。その「何か」とは、入力信号の決まったポイントです。オシロスコープの複数のチャンネルを使用している場合は入力信号の論理演算の組み合わせ（ロジック「パターン」トリガ）に基づいたポイントも使用できます。

オシロスコープのトリガに似た状況にあるのが、競馬の着順判定写真です。繰り返しイベントではありませんが、カメラのシャッターを、先頭の馬の鼻先がゴールラインを前進方向に越えた瞬間と同期させる必要があります。レースの最初から最後まで間にランダムに競馬の写真を撮影するのは、オシロスコープでトリガをかけずに波形を表示するのと似ています。

オシロスコープのトリガをより良く理解するために、ラボ#1で使用した正弦波の測定をもう少し行います。

- 1 チャンネル1入力BNCと“Demo1”端子を1本のオシロスコープ・プローブで接続します。このプローブのグランド・クリップを中央端子（グランド）に接続します。
- 2 オシロスコープのフロント・パネルにある[Default Setup]を押します。
- 3 [Help]を押し、Training Signals（トレーニング信号）ソフトキーを押します。
- 4 Entry ノブを使って“Sine（正弦波）信号”トレーニング信号を選択し、Output（出力）ソフトキーを押してオンにします。
- 5 チャンネル1のV/divを500 mV/divに設定します。
- 6 オシロスコープのタイムベースを50.00 ns/divに設定します。
- 7 フロントパネルの[Trigger（トリガ）]キーを押します。

オシロスコープのディスプレイには、図12のような画面が表示されているはずですが、オシロスコープのデフォルト・トリガ条件では、オシロスコープは、チャンネル1（ソース選択）によってプロービング/捕捉されている正弦波の立ち上がり（スロープ選択）エッジ（トリガ・タイプ選択）で、この信号が0.0 Vレベル（トリガ・レベル設定）を超えたときに、トリガするはずですが、水平位置コントロールが0.0 s（デフォルト設定）に設定されている場合は、このトリガ・ポイントは画面中央にあります。トリガ・ポイント以前に捕捉された波形データ（ディスプレイの左側）が負の時間データと見なされるのに対して、トリガ・ポイント後に捕捉された波形データ（ディスプレイの右側）は正の時間データと見なされます。



図12 チャンネル1の立ち上がりエッジ (0.0 V) でのオシロスコープのトリガ

ディスプレイ上端付近のオレンジの「中塗り」三角形は、トリガ・ポイント (0.0 s) がある場所を示しています。水平遅延/位置を調整すれば、このオレンジの三角形が画面中央から移動します。画面中央にあるオレンジの「中空」三角形 (遅延/位置が0.0 sでない場合にだけ表示されます) は、オシロスコープのデフォルトの「中心」基準を使用している場合の遅延設定の時間位置を示しています。

- 8 トリガ・レベル・ノブを時計回りに回して、トリガ・レベル電圧設定を上げます。
- 9 トリガ・レベル・ノブを反時計回りに回して、トリガ・レベル電圧設定を下げます。

トリガ・レベル電圧設定を上げるに従って、正弦波が左にシフトするのがわかるはずですが、トリガ・レベル電圧設定を下げると、正弦波が右にシフトします。トリガ・レベル・ノブを最初に回したときに、オレンジの水平トリガ・レベル・インジケータが表示されます。正確なトリガ電圧設定が、オシロスコープのディスプレイの右上コーナーに常時表示されます。トリガ・レベル・ノブを回すのをやめれば、オレンジのトリガ・レベル・インジケータはタイムアウトになり、数秒後に消えます。ただし、波形を基準にしたトリガ・レベルの設定位置を示すために、左側の波形の格子線領域の外側に、黄色のトリガ・レベル・インジケータがその後も表示されます。

2 基本的なオシロスコープ/WaveGen測定ラボ

10 トリガ・レベル・ノブを回して、トリガ・レベルを**500 mV**ちょうど（画面中央から1 div上）に設定します。ディスプレイの右上コーナに正確なトリガ・レベルが表示されます。

11 **Slope**（スロープ）ソフトキーを押して、**Falling**（立ち下がり）エッジ・トリガ条件を選択します。

図13のように、正弦波が180度反転し、波形の立ち下がりエッジが画面中央に同期されているように見えているはずです。



図13 正弦波の立ち下がりエッジ（+500 mV）でのトリガ

12 オレンジのレベル・インジケータが正弦波の正のピーク（約+1.5 V）を超えるまで、トリガ・レベル電圧設定を上げます。

トリガ・レベルを正弦波より上に設定した場合は、オシロスコープはこの特定のトリガ・レベル設定ではエッジ交差を検出できないため、オシロスコープのデータ収集／表示（繰り返し写真撮影）はもう入力信号に同期されません。オシロスコープのディスプレイには、図14のような画面が表示されているはずです。オシロスコープは現在「自動トリガ」中です。

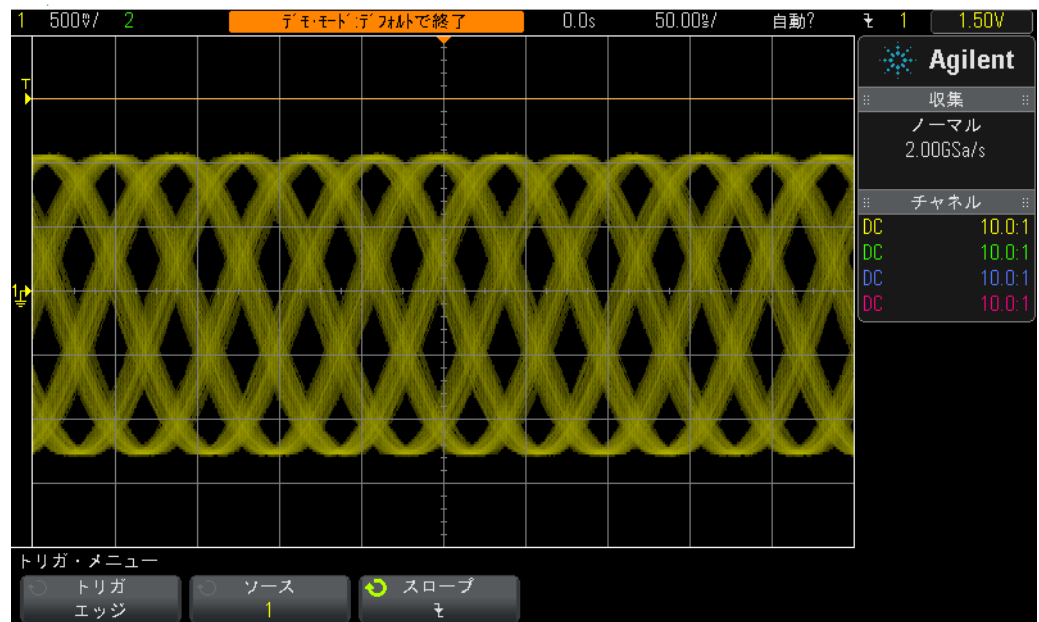


図14 入力信号より上のトリガ・レベル設定での自動トリガ

Auto Triggerは、オシロスコープのデフォルト・トリガ・モードです。オシロスコープは、**Auto Trigger**（自動トリガ）モードを使用している場合に、一定期間後に（時間はオシロスコープのタイムベース設定によって異なる）有効なトリガ条件（この場合、正弦波のエッジ交差）が検出されないと、非同期トリガを発生させ、ランダムな時間に入力信号の写真撮影（データ収集）を開始します。「写真撮影」は現在、入力信号に同期されているのではなく、ランダムなので、画面全体の波形が「ぼやけ」て見えます。このような波形の「ぼやけ」から、オシロスコープが入力信号でトリガしていないことがわかります。

13 トリガ・レベル・ノブを押して、トリガ・レベルを自動的に約50 %レベルに設定します。

14 チャンネル1プローブをDemo1端子から外します。

チャンネル1プローブを信号源から切り離れた状態では、ベースライン0.0 VのDC信号が表示されているはずです。この0.0 VのDC信号ではもうエッジの交差は見られないので、トリガの対象となるものはなく、オシロスコープは、このDCレベルの信号を表示するために「自動トリガ」を再開します。

オシロスコープには、デフォルトの**Auto Trigger**モードに加えて、**Normal Trigger**（ノーマルトリガ）モードと呼ばれるユーザ選択可能なトリガ・モードもあります。今度は、**Normal Trigger**モードと**Auto Trigger**モードはどのように違うのか確認します。

15 チャンネル1プローブをDemo1端子に再接続します。トリガをかけられた正弦波が再度表示されているはずです。

16 フロントパネルの[Mode/Coupling]キー（トリガ・レベル・ノブの右側）を押します。

17 **Entry**ノブを回して、トリガ・モードの選択を**Auto**（自動）から**Normal**（ノーマル）に変更します。この時点では、表示波形にはまったく違いは見られないはずです。

18 チャネル1プローブをDemo1端子から再び外します。

プローブを外す前に発生した最後のデータ収集（最後の写真）が表示されているはずです。**Auto Trigger**モードで表示された0.0 VのDCレベル・トレースは、表示されません。**Normal Trigger**モードを選択した場合は、有効なトリガ条件（この場合はエッジ交差）が検出された**場合**に限り、波形だけが表示されます。

19 トリガ・レベルを+1.50 V（正弦波より上）に設定するために、トリガ・ノブを時計回りに回します。

20 チャネル1プローブをDemo1端子に再接続します。

正弦波が接続され、オシロスコープに入力されていますが、この信号の繰り返し表示はどこでしょうか？ **Normal**トリガ・モードを使用しているので、有効なエッジ交差が必要なことに変わりはありませんが、トリガ・レベルが波形より上（@+1.50 V）に設定されているため、有効なエッジ交差がありません。このため、**Normal**トリガ・モードについてはご覧のように、どこの波形かに関する手がかりはなく、DCを測定することはできません。

21 トリガ・レベル・ノブを押して、トリガ・レベルを自動的に約50 %レベルに設定します。繰り返し波形の表示が再開されるはずです。

以前のオシロスコープでは、今日**Normal**トリガ・モードと呼んでいるものを**Triggered**トリガ・モードと呼んでいたものもありましたが、このモードでは、オシロスコープは有効なトリガ条件が検出された場合にだけトリガをかけて、自動トリガは発生させない（非同期トリガによる非同期写真撮影）ため、実はこのトリガ・モードをよく表している用語であるかもしれません。さらに、**Normal**トリガ・モードは「通常」使用されるトリガ・モードではなく、オシロスコープのデフォルト・トリガ・モードでもないというように、少し矛盾した表現です。通常使用されるトリガ・モードは**Auto**トリガ・モードで、このモードがオシロスコープのデフォルト・トリガ・モードです。

こうなると、**Normal**トリガ・モードはいつ使用すればよいのか、疑問に思うかもしれません。**Normal**トリガ・モードは、トリガ・イベントがごく稀にしか発生しない場合（シングルショット・イベントを含む）に使用します。例えば、超高速パルスを表示するようにオシロスコープをセットアップした場合でも、このパルスがわずか1 Hzレート（1秒の1回）で発生する場合には、オシロスコープのトリガ・モードが**Auto**トリガ・モードに設定されていると、オシロスコープは多数の非同期自動トリガを発生させ、発生頻度の少ない高速パルスを表示することはできません。この場合は、オシロスコープが有効なトリガ・イベントを取得するまで待つてから波形を表示するように、**Normal**トリガ・モードを選択する必要があります。もう少し後のラボ#8およびラボ#9で、このような信号を使用します。次のラボでは、ノイズの大きな信号でのトリガについて詳しく学びます。

ラボ#3：ノイズの大きな信号でのトリガ

正弦波（繰り返し波形）は、オシロスコープがトリガをかける信号の中でもおそらく最も単純なタイプです。しかし、実環境では、信号はそれほど単純ではありません。このラボでは、ノイズの大きな環境（実環境条件）において信号でトリガをかける方法や、波形アベレージングによってデジタイズした波形のノイズを除去する方法を学びます。

- 1 チャンネル1入力BNCと“Demo1”端子を1本のオシロスコープ・プローブで接続します。このプローブのグランド・クリップを中央端子（グランド）に接続します。
- 2 オシロスコープのフロント・パネルにある[Default Setup]を押します。
- 3 [Help]を押し、**Training Signals**（トレーニング信号）ソフトキーを押します。
- 4 **Entry**ノブを使って、今度は“**Sine with Noise**（ノイズのある正弦波）”信号を選択し、**Output**（出力）ソフトキーを押してオンにします。
- 5 チャンネル1のV/divを**500 mV/div**に設定します。
- 6 オシロスコープのタイムベースを**200.0 μ s/div**に設定します。

オシロスコープのデフォルト設定状態では、オシロスコープは0.0 Vの立ち上がりエッジでトリガするように設定されていますが、こうしたノイズの大きい正弦波では、立ち上がりエッジと立ち下がりエッジの両方でトリガをかけているように見えます（図15を参照）。オシロスコープは実際には、立ち上がりエッジだけでトリガをかけています。正弦波の立ち下がりエッジでトリガをかけているように見える場合でも、オシロスコープは実際には、正弦波に乗っているランダム・ノイズの立ち上がりエッジでトリガをかけています。

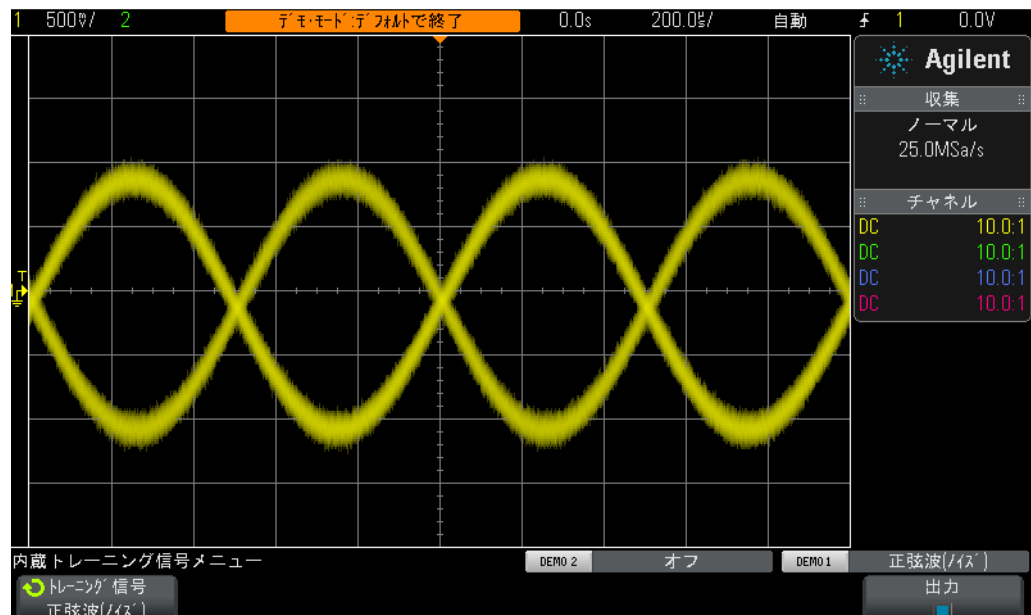


図15 ノイズの大きな環境における信号に対するトリガ

7 タイムベースを **200.0 ns/div** に設定して、オシロスコープがノイズの立ち上がりエッジでトリガをかけていることを確認します。

8 オシロスコープのタイムベース設定を **200.0 μ s/div** に戻します。

それでは、正弦波の立ち上がりエッジと同時に発生するインスタンスの間だけオシロスコープのトリガを実行するにはどうすればよいのでしょうか（ノイズなしで）？今度は、オシロスコープのユーザ選択可能なトリガ結合オプションの一部について詳しく学びます。

9 フロントパネルの **[Mode/Coupling]** キー（トリガ・レベル・ノブ付近）を押します。

10 **HF Reject**（HF除去）ソフトキーを押して、「高周波除去」フィルタをオンにします。

オシロスコープへの入力信号は、実際には分割され、2つのアナログ経路を通してオシロスコープ内部に送られます。一方の経路を通る信号は、オシロスコープのデータ収集システム（写真撮影システム）によって捕捉されます。同様の信号が別の経路を通して送られ、オシロスコープのアナログ・トリガ回路によって処理されます。（付録Aのオシロスコープのブロック図を参照してください。）**HF Reject**（HF除去）を選択した場合は、オシロスコープのアナログ・トリガ回路で処理された信号が最初に **50 kHz** ローパス・フィルタを通されます。ノイズは高周波成分など広範囲な周波数で構成されるため、トリガ回路では正弦波のノイズの大部分は除去/減衰されますが、データ収集回路を通して送られる信号が影響を受けることはありません（ノイズは残存します）。このようにノイズは見られますが（図16を参照）、オシロスコープのトリガ回路にノイズは存在しません。しかし、制限があります。

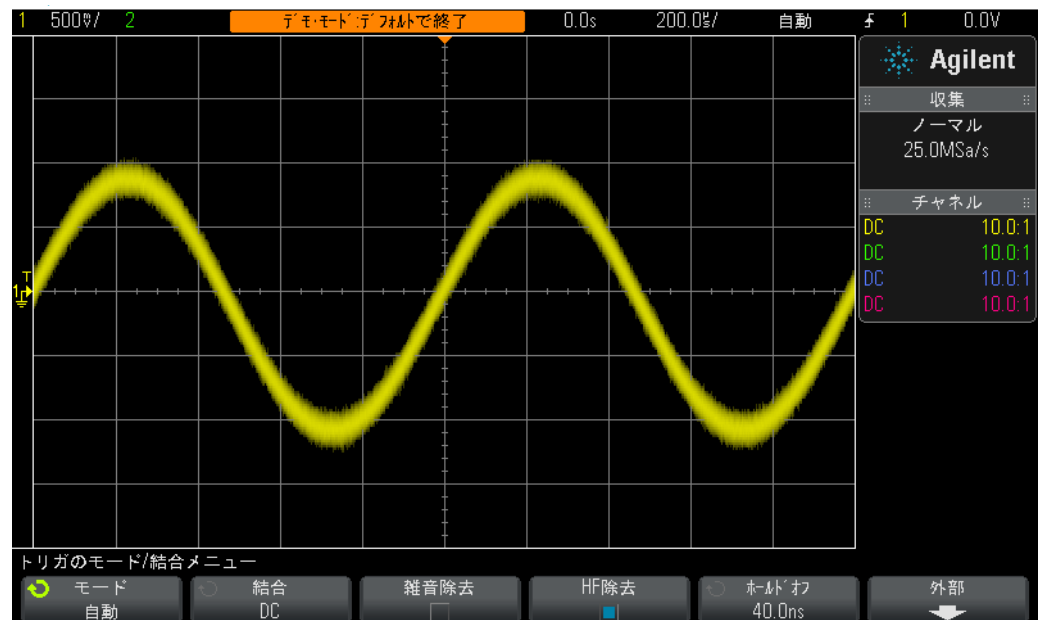


図16 HF Rejectを使用したノイズの大きな正弦波でのトリガ

HF Reject (HF除去) フィルタは、50 kHzの固定ローパス・ハードウェア・フィルタに基づいたものであるため、より高周波の信号には使用できません。この50 kHzローパス・フィルタが1 kHzの正弦波トレーニング信号に影響を与えることはありませんが、ノイズの大きな20 MHzの正弦波に**HF Reject** (HF除去) トリガを使用しようとしても、50 kHzフィルタではノイズと20 MHzの正弦波の基本波成分の両方が「除去」されるため、トリガをかけることは一切できません。ただし、さらに2つのオプションがあります。

11 もう一度**HF Reject** (HF除去) ソフトキーを押すと、オフになります。正弦波の立ち上がりエッジと立ち下がりエッジで再びオシロスコープがトリガをかけているように見えるはずです。

12 Noise Rej (雑音除去) ソフトキーを押して、「ノイズ除去」フィルタをオンにします。

Noise Rej (雑音除去) フィルタは周波数ではなく、振幅に基づいたものです。単一のトリガ・レベルについて説明してきましたが、有効なトリガとみなされるためには、信号は実際には2つのレベルを通過しなければなりません。これは、「トリガ・ヒステリシス」と呼ばれます。また、「トリガ感度」と呼ばれることもあります。ほとんどのオシロスコープのデフォルトのトリガ感度は、0.5 divです。つまり、有効なトリガ条件とみなされるためには、入力信号は0.5 div以上のp-pで振動しなければなりません。ただし、これはまた、ノイズが約0.5 divのp-p値を超えた場合に、オシロスコープがノイズでトリガをかけることを意味します。**Noise Rej** (雑音除去) を選択した場合は、オシロスコープのヒステリシスが約1.0 divのp-p値まで拡大されます。このノイズの大きな特定の正弦波の場合は、1.0 divのトリガ・ヒステリシスによって、ほとんどの場合、問題が解決されます。オシロスコープのディスプレイに若干の「ちらつき」が見られる場合があります。これは、1.0 divのヒステリシスではまったく不十分であることを意味します。もう1つの解決策はオシロスコープのトリガ・ホールド機能を使用することですが、これについてはラボ#7で説明します。

このノイズを含む正弦波の測定から離れる前に、この正弦波を測定したいけれど、ランダム・ノイズを除去して表示するにはどうすればよいか、という疑問に答えます。

13 HF Reject (HF除去) ソフトキーを押します。現在、非常に安定したトリガを提供するために、高周波除去フィルタもノイズ除去フィルタもオンになっているはずです。

14 フロント・パネルのWaveformセクションにある[Acquire]キー (Cursors (カーソル) ノブのすぐ下) を押します。

15 Entry ノブを回して、オシロスコープのデータ収集モードを**Normal** (ノーマル) から**Averaging** (アベレージ) に変更します。

Averaging データ収集モードが選択されれば、オシロスコープは複数の波形データをアベレージングします。信号に乗っているノイズがランダムな場合は、ノイズ成分が除去されるため、信号の基本波成分をより正確に測定できるようになります (図17を参照)。

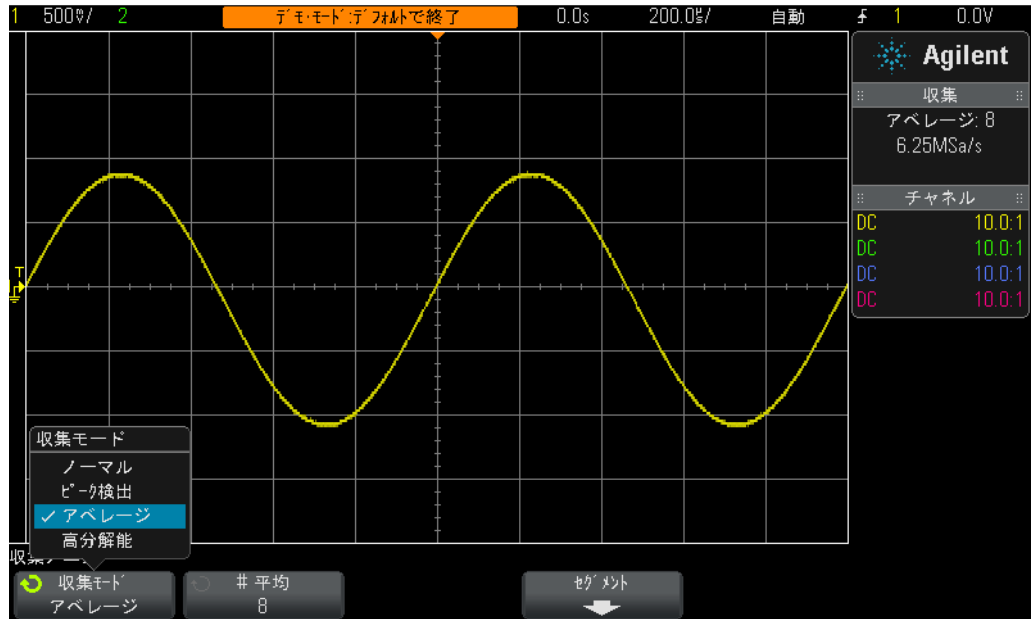


図17 オシロスコープのAveragingデータ収集モードを使用したノイズの除去

16 ラボ#1で学んだ測定手法を用いて、以下を求めます。

周期 = _____
 周波数 = _____
 Vp-p = _____

ラボ#4：オシロスコープのテスト結果の記録／保存

さまざまな回路の実験課題を終えれば、教授からテスト・レポートを書き上げるように求められる場合があります。場合によっては、測定の画像（写真）をラボ・レポートに貼り付ける必要があります。さらに、1回のセッションで1つの実験課題を終えることができない場合は、後でテストを続けたいこともあります。しかし、オシロスコープをセットアップし直したり、波形を捕捉し直したりする必要がなく、やめたところからまた続けることができれば素晴らしいことです。このラボでは、画像、基準波形、セットアップを含む、さまざまな種類のオシロスコープ・ファイルのセーブ／リコール方法を学びます。このラボでは、個人用のUSBメモリ・デバイスにアクセスできなければなりません。

- 1 チャンネル1入力BNCと“Demo1”端子を1本のオシロスコープ・プローブで接続します。このプローブのグランド・クリップを中央端子（グランド）に接続します。
- 2 オシロスコープのフロント・パネルにある[Default Setup]を押します。
- 3 [Help]を押し、**Training Signals**（トレーニング信号）ソフトキーを押します。
- 4 **Entry**ノブを使って“**Sine**（正弦波）信号”波形を選択し、**Output**（出力）ソフトキーを押してオンにします。
- 5 チャンネル1のV/divを**500 mV/div**に設定します。
- 6 オシロスコープのタイムベースを**100 ns/div**に設定します。

この時点では、正弦波の5つのサイクルが表示されているはずです（図18を参照）。今度は、この画像（写真）の保存、波形の保存、セットアップの保存を行います。

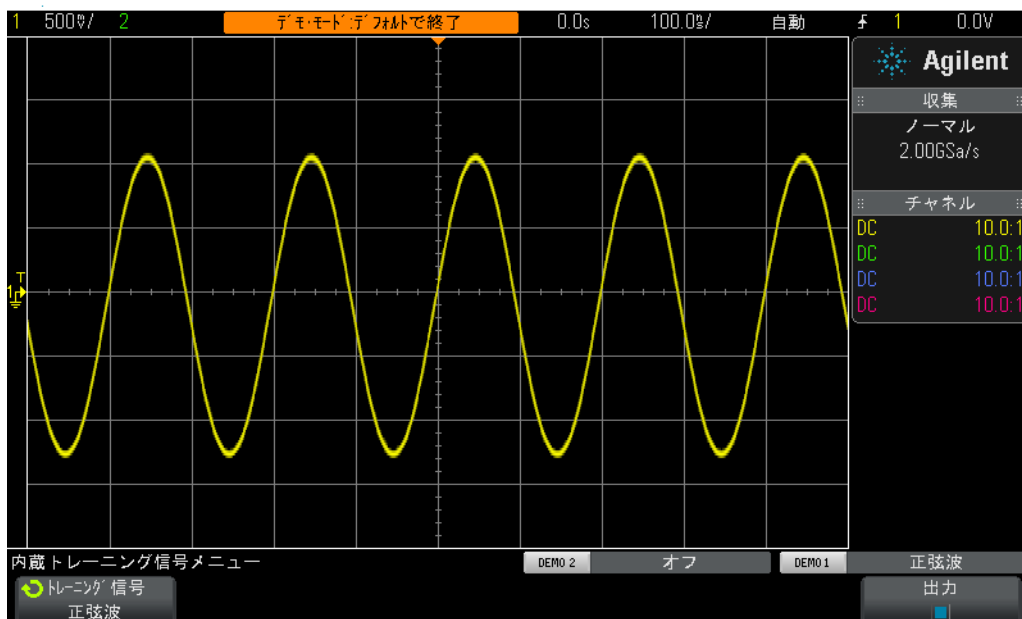


図18 保存したい正弦波の5つのサイクル

- 7 自分のUSBメモリ・デバイスをおシロスコープのフロント・パネルにあるUSBポートに挿入します。
- 8 フロント・パネルの Cursors (カーソル) ノブの下の File セクションにある [Save/Recall] キーを押します。
- 9 **Save** (保存) ソフトキーを押し、さらに **Format** (形式) ソフトキーを押します。
- 10 **Entry** ノブを使って、**PNG 24-bit image (*.png)** を選択します。
- 11 **Save to** (保存先) (または **Press to go** (位置)) ソフトキーを押し、**Entry** ノブを使って \usb まで移動します。
- 12 **File Name** (ファイル名) ソフトキーを押し、**Entry** ノブを回して、このファイルに名前を付けます。差し当たり、“test” ということにします。
- 13 汎用入力ノブを回すと、英数字文字列がポップアップ表示されます。最初の文字 (この場合 “t”) に合わせ、**Enter** (入力) ソフトキーを押すか、**Entry** ノブを押します。
- 14 このファイル名の残りの各文字に対して、ステップ #13 を繰り返します。
- 15 **Delete** (文字削除) ソフトキーを押して、デフォルトのファイル名から残りの文字を削除します。
- 16 **Increment** (自動インクリメント) ソフトキーを押して、自動増分をオフにします (ボックスが黒になっているはずです)。自動インクリメントをオンにすれば、オシロスコープはファイル名に対応する番号を自動的に増分します。これは複数の画像を保存したい場合に有効で、保存操作のたびに異なるファイル名を手動で再入力する必要はありません。

17 Press to Save (押して保存) ソフトキーを押します。

USBメモリ・デバイスには、[図18](#)のようなオシロスコープのディスプレイの保存画像があるはずですが、ファイル名は“test.png”です。後でこのファイルを開いたり、Microsoft Word文書に挿入して、実際にそこにあるか確認することができます。今度は、オシロスコープのセットアップ構成を保存します。

18 フロントパネルの[Save/Recall]キーを押します。

19 Save (保存) ソフトキーを押し、さらに**Format** (形式) ソフトキーを押します。

20 Entryノブを使って、**Setup (*.scp)**を選択します。

21 Save to (保存先) (あるいは**Press to go**または**Location** (位置)) ソフトキーを押します。

22 Entryノブを使って\usbまで移動し、**Entry**ノブを押します。

23 File Name (ファイル名) ソフトキーを押します。前に入力したファイル名が新しいデフォルト・ファイル名になることがわかります。“setup”ファイル・フォーマットは異なるファイル名拡張子を使用するので、同じファイル名を使用することができます。

24 Press to Save (押して保存) ソフトキーを押します。

USBメモリ・デバイスには、オシロスコープの現在のセットアップ構成が保存された“test.scp”という名前のファイルがあるはずですが、このセットアップ構成を後でリコールします。オシロスコープの内部フラッシュ・メモリに、セットアップを保存することもできます。ただし、このオシロスコープを次に使用する可能性のある学生仲間の一人が、このメモリ・レジスタを自分の設定で上書きする可能性もあります。このため、共有オシロスコープを使用する学生は、オシロスコープの設定や波形を自分の個人用メモリ・デバイスを使って保存することを常に習慣づけておくとい良いでしょう。今度は、基準波形データ・ファイルを保存します。

25 フロントパネルの[Save/Recall]キーを押します。

26 Save (保存) ソフトキーを押し、さらに**Format** (形式) ソフトキーを押します。

27 Entryノブを使って、**Reference Waveform data file (*.h5)** (基準波形データ (*.h5)) を選択します。

28 Save to (保存先) (または**Press to go**) ソフトキーを押します。

29 Entryノブを使って\usbまで移動し、**Entry**ノブを押します。

30 File Name (ファイル名) ソフトキーを押します。やはり、このファイル・フォーマットも固有のファイル名拡張子 (test.h5) を持つので、新しい名前を定義する必要はありません。

31 Press to Save (保存先) ソフトキーを押します。

前に.pngファイルを保存した時には、これはオシロスコープのディスプレイのピクセル・マップでした。このタイプのファイルはオシロスコープにリコールすることはできないので、このタイプのファイルに保存されているデータに対して測定を実行することはできません。.pngファイルも.bmpファイルも、ラボ・レポートへの挿入など、主にレポートの作成に有用です。先程保存した「基準波形」データ・ファイル (.h5) には、電圧対時間データがX-Yペア値として保存されます。このタイプのファイルは、後でオシロスコープにリコールして解析することができます。また、このタイプのファイルは、多くのPCアプリケーションにリコールして、より詳細なオフライン解析を行うことができます。

オシロスコープのセットアップ構成と波形（正弦波の4サイクル）を保存したので、これらのファイルをリコールできるか確認してみますが、まずは、スクリーン上に表示されている現在のセットアップと波形を破棄するために、デフォルト設定から開始します。

32 [Default Setup]を押します。

33 [Save/Recall]を押します。

34 Recall（リコール）ソフトキーを押し、さらに隣の**Recall**（呼出）ソフトキーを押します。

35 Entryノブを使って、リコールするファイル・タイプとして**Setup**を選択します。

36 Location（位置）（あるいは**Press to go**または**Load from**）ソフトキーを押し、**Entry**ノブを使って“**test**”まで移動します。

37 Press to Recall（押して呼出）ソフトキーを押すか、**Entry**ノブを押します。

オシロスコープのセットアップが前の構成に復元されたはずですが、オシロスコープにはトレーニング信号の状態は保存されません。このため、現時点では、プローブの入力に信号が存在していないため、ベースライン（0.0 V）信号の波形だけが表示されているはずです。今度は、前に保存した波形をリコールします。

38 Recall（呼出）ソフトキーを押し、**Entry**ノブを使って**Reference Waveform data (*.h5)**（標準波形データ (*.h5))を選択します。

39 Load from（押して選択）（あるいは**Press to go**または**Location**）ソフトキーを押し、**Entry**ノブを使って“**test**”まで移動します。

40 Press to Recall（押して呼出）ソフトキーを押すか、**Entry**ノブを押します。

前のセットアップ構成を使って保存した正弦波が（0.0 Vのライブ・ベースライン信号と一緒に）表示されているはずです（[図 19](#)を参照）。この時点で、セットアップを変更することも、保存波形に対して測定を実行し続けることも可能です。USBメモリ・デバイスは、データのセーブ／リコール後にいつでも取り外すことができます。

2 基本的なオシロスコープ/WaveGen測定ラボ

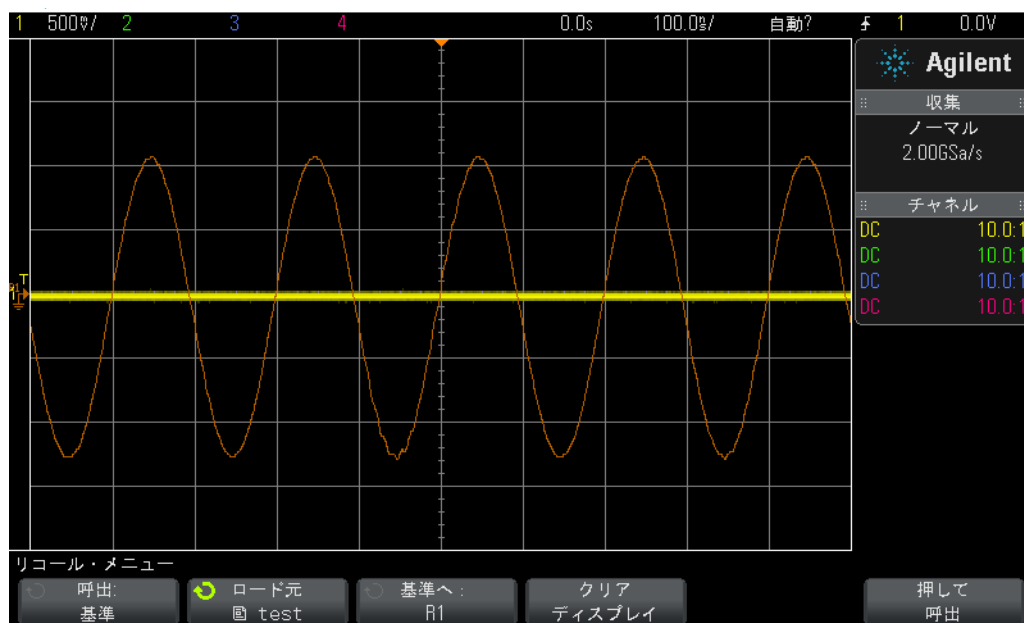


図19 オシロスコープのセットアップ構成／波形のリコール

ラボ#5 : 10:1パッシブ・プローブの補正

このオシロスコープ・トレーニング・ガイドの最初の4つのラボが終了し、オシロスコープを使用した基本的な電圧/タイミング測定に多少慣れているはずなので、一歩立ち戻ってもう一度プロービングについて説明します。このガイドの測定前の準備のセクションで、プロービングについて簡単に説明し、10:1パッシブ・プローブとオシロスコープの入力を組み合わせたものの電気的入力モデルについて紹介しました。このプローブとオシロスコープの電気的モデルをここでもう一度、図20に示します。

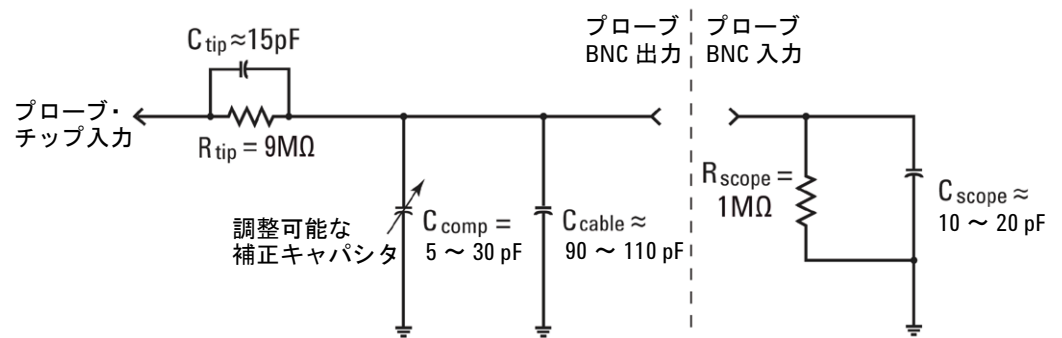


図20 オシロスコープの1 MΩ入力インピーダンスに接続された10:1パッシブ・プローブの簡略化した回路図

お忘れでなければ、この電気的モデルの容量性素子を見無視して、抵抗素子だけを考慮するように指示されたはずですが、抵抗素子だけを見ると、プローブの9 MΩのプローブ・チップ抵抗とオシロスコープの1 MΩの入力インピーダンスの組み合わせによって、10:1の電圧比が達成されていることがわかりました。低周波/DCアプリケーションでは、容量性素子を見無視するのが妥当ですが、ダイナミック信号を測定する必要がある場合は(オシロスコープの主要な測定アプリケーション)、この電気的モデルの容量性素子を見無視することはできません。

すべてのオシロスコープ・プローブおよびオシロスコープ入力に固有なのが、寄生容量です。寄生容量としては、プローブ・ケーブル容量 (C_{cable}) やオシロスコープの入力容量 (C_{scope}) があります。「固有/寄生」というのは単に、電気的モデルのこれらの素子は意図的にデザインされたものではなく、実際のエレクトロニクスの世界においてはありがたくない現実であるということの意味です。さらに、固有/寄生容量は、オシロスコープやプローブによって異なります。しかし、システムに固有の容量性素子を補正するためにデザインされた容量性素子を追加しなければ、ダイナミック信号条件にあるシステムのリアクタンス (非DC) によって、プロービング・システム全体のダイナミック減衰が目標とする10:1と多少異なる比率に変化する可能性があります。追加の意図的にデザインされたプローブ・チップ・キャパシタ (C_{tip}) と調整可能な補正キャパシタ (C_{comp}) の目的は、10:1の抵抗減衰比と一致する容量性リアクタンスの減衰を達成することです。補正キャパシタを適切に調整することによって、9 MΩ抵抗と並列接続されたプローブ・チップ・キャパシタンスの時定数が、オシロスコープの1 MΩ入力抵抗と並列接続された固有/補正キャパシタンスの時定数と一致するようになります。

2 基本的なオシロスコープ/WaveGen測定ラボ

この理論の説明にさらに多くの時間を費やすのではなく、信号に接続して、補正不足、過剰補正、適正補正の影響を確認します。チャンネル1プローブをこれまでのラボとは違う端子に接続するので注意してください。

- 1 オシロスコープの**両方**のプローブを**Probe Comp**端子に接続します。**Demo2**端子と同じ端子です。
- 2 オシロスコープのフロント・パネルにある**[Default Setup]**を押します。
- 3 チャンネル1を**1.0 V/div**に設定します。
- 4 チャンネル1のオフセット/位置を**0.0 V** (デフォルト設定) に設定します。
- 5 トリガ・レベル・ノブを押して、チャンネル1のトリガ・レベルを約**50 %**に設定します。
- 6 **[2]**フロントパネル・キーを押して、チャンネル2をオンにします。
- 7 チャンネル2を**1.0 V/div**に設定します。
- 8 チャンネル2のオフセットを約**+3.5 V**に設定します。
- 9 オシロスコープのタイムベースを**200.0 μ s/div**に設定します。

プローブが正しく補正されている場合は、オシロスコープのディスプレイには、非常にフラットな応答の**1 kHz**の方形波が2つ表示されているはずです (図21を参照)。今度は、各プローブのプローブ補正を調整します。

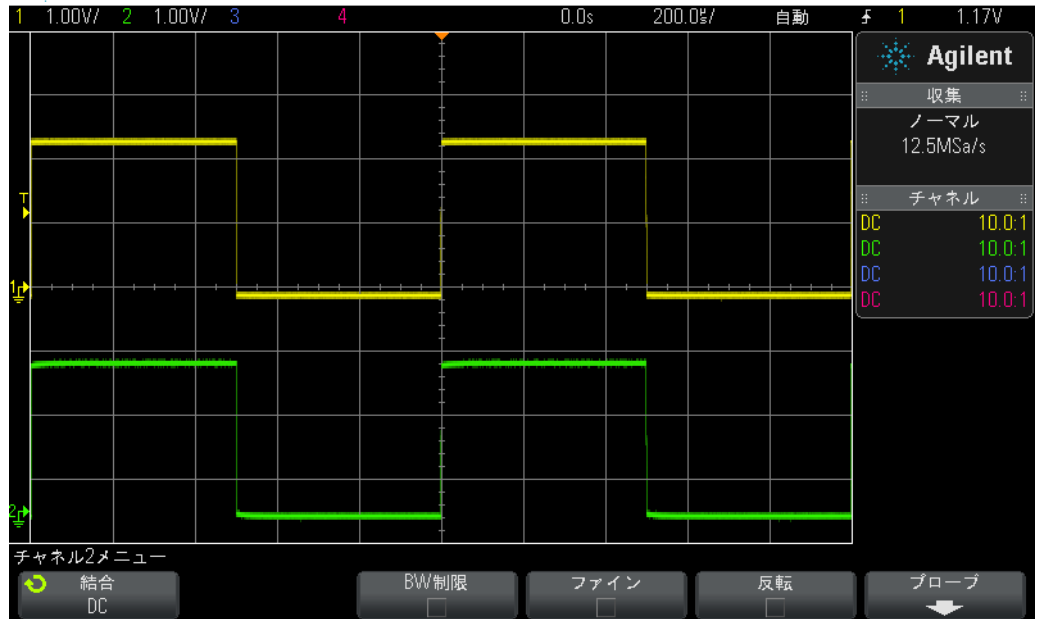


図21 オシロスコープの1 kHzのプローブ補正信号を使用した10:1パッシブ・プローブの補正

10 小型マイナス・ドライバを使用して、各プローブの本体にある可変キャパシタを調整します。この調整がプローブのBNC終端コネクタ付近にある場合もあります。

図22に、チャンネル1プローブ（黄色の波形）の過剰補正の例と、チャンネル2プローブ（緑色の波形）の補正不足の例を示します。完全に近い方形波をモニターできない場合は、オシロスコープに図21のような波形が表示されるまで、プローブのプローブ補正を再調整します。



2 基本的なオシロスコープ/WaveGen測定ラボ

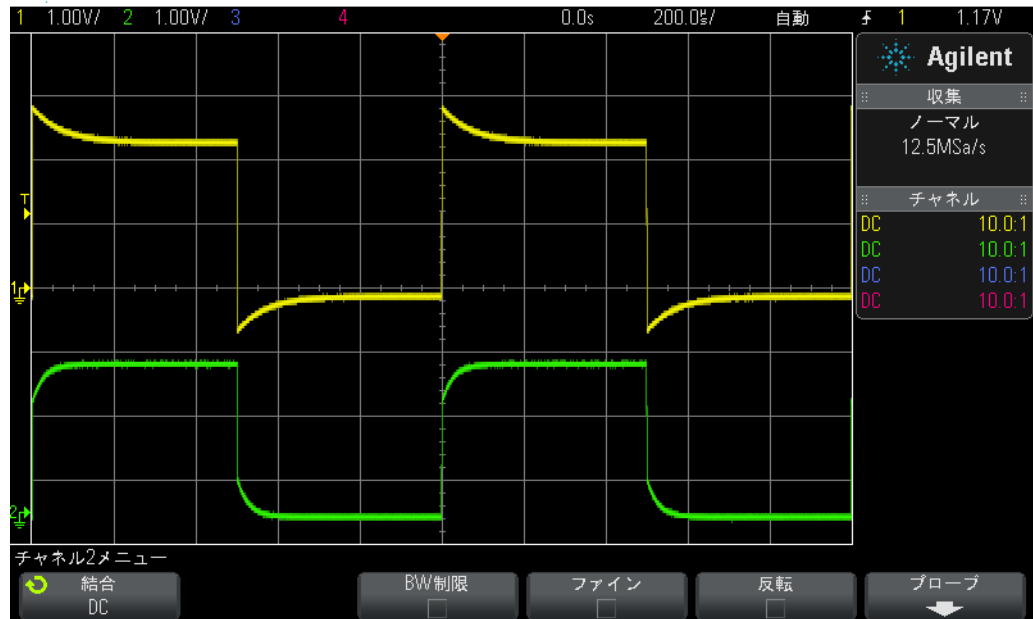


図22 プローブの不適切な補正

プローブは適切に調整されたので、これらのプローブをこのオシロスコープで使用し続けている限り、次にオシロスコープを使用するときに、プローブを再調整する必要はありません。

これで、このラボの実習は終わりです。時間が少なく、この章の最後のラボを完了する必要があるという場合は、ラボ#6にスキップし、このラボの残りの内容は後で読んでください。

適切な容量性補正の計算

問題がある場合は、以下の前提条件に基づいて適切な補正を行うために必要な補正キャパシタンス量 (C_{comp}) を計算します。

$$R_{tip} = 9 \text{ M}\Omega$$

$$R_{scope} = 1 \text{ M}\Omega$$

$$C_{scope} = 15 \text{ pF}$$

$$C_{cable} = 100 \text{ pF}$$

$$C_{tip} = 15 \text{ pF}$$

$$C_{parallel} = C_{scope} + C_{cable} + C_{comp}$$

$$C_{comp} = ?$$

必要な補正キャパシタンス量 (C_{comp}) を計算する最も簡単な方法は、次のように、 R_{tip} と C_{tip} の並列結合の時定数 ($1/RC$) と、 R_{scope} と $C_{parallel}$ の並列結合の時定数を等しくすることです。

$$\frac{1}{R_{tip} \times C_{tip}} = \frac{1}{R_{scope} \times C_{parallel}}$$

$C_{parallel}$ は、プローブ/オシロスコープ・モデルの3つの容量性素子の組み合わせです。

もう1つの計算方法は、 $C_{parallel}$ の容量性リアクタンスの9倍と C_{tip} の容量性リアクタンスの1倍を等しくすることです。これにより、抵抗だけの回路に起因する減衰比 (10:1) と同じ、容量性リアクタンスによる減衰比が実現します。

$$\frac{1}{2\pi f C_{tip}} = 9 \times \frac{1}{2\pi f C_{parallel}}$$

$$C_{comp} = \text{_____}$$

プローブの負荷

最も正確なオシロスコープ測定を実現するために、10:1パッシブ・プローブを正しく補正する以外に考慮する必要があるもう1つの問題が、プローブの負荷です。すなわち、プローブとオシロスコープを被試験デバイス (DUT) に接続すれば、回路の動作が変化しますか、という問題です。回路に測定器を接続すれば、測定器自体がDUTの一部になり、「負荷がかかる」か、信号の動作がある程度変化します。(計算した C_{comp} の値に加えて) 上述の与えられた抵抗値とキャパシタンス値を使用すれば、プローブとオシロスコープの負荷の影響をまとめて、単一の抵抗とキャパシタの並列結合としてモデル化することができます (図23を参照)。

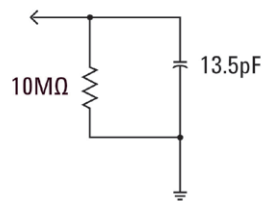


図23 10:1パッシブ・プローブとオシロスコープの負荷モデル

2 基本的なオシロスコープ/WaveGen測定ラボ

低周波/DCアプリケーションでは、10 MΩの抵抗によって負荷が支配されますが、これはほとんどの場合、問題にはなりません。しかし、100 MHzのデジタル・クロック信号をプロービングしているとしたらどうでしょうか？このデジタル・クロックの5次高調波（この信号の形状を形成する重要な成分）は、500 MHzになります。今度は、この負荷モデルの13.5 pFのキャパシタンスによるリアクタンスを計算します（図23を参照）。

$$X_c = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi \times 500 \times 10^6 \times 13.5 \times 10^{-12}} = 23.6\Omega$$

13.5 pFという値はあまり大したことのないように思われるかもしれませんが、高周波では、この負荷キャパシタンスはかなり大きな量になります。このような高周波アプリケーション向けに、ほとんどのオシロスコープ・ベンダは、ずっと入力容量の低い（pF以下）アクティブ・プロービング・ソリューションをオプションで提供しています。しかし、これらの特殊なプローブは、代表的な10:1パッシブ・プローブと比べるとはるかに高価です。

最後に、このラボで紹介したプローブ+オシロスコープ・モデルは非常に簡素化されているということを認識しておいてください。より正確なモデルには、誘導性素子も含まれます。ワイヤ、特にグランド・リードは、高周波アプリケーションの誘導性素子と見なす必要があります。

ラボ#6 : WaveGen内蔵ファンクション・ジェネレータの使用法

オシロスコープの他に、電源、デジタル・マルチメータ、ファンクション・ジェネレータなど、回路ラボではさまざまなテスト機器が使用されます。ファンクション・ジェネレータは、回路の設計や実験にダイナミック入力として使用でき、さまざまなタイプ/形状の信号を生成できます。AgilentのInfiniiVision 2000/3000 Xシリーズ オシロスコープには、WaveGenと呼ばれる内蔵ファンクション・ジェネレータ (オプション) があります。このラボには、使用しているオシロスコープに内蔵ファンクション・ジェネレータがインストールされている必要があります。ファンクション・ジェネレータの機能が使用可能であるかわからない場合は、フロントパネルの[Wave Gen]キーを押します。このオプションが使用可能な場合は、WaveGenのメニューが表示されます。このオプションが使用できない場合は、このオプションがまだライセンスされていないことを示すメッセージが画面上に表示されます。オシロスコープにWaveGenオプションが搭載されていると仮定して、このラボを開始して、汎用のファンクション・ジェネレータの使用法を学びます。

- 1 オシロスコープからプローブをすべて取り外します。
- 2 ジェネレータの出力 (電源スイッチの隣) とチャンネル1入力BNCを50 Ω同軸BNCケーブルで接続します。
- 3 [Default Setup]を押します。
- 4 Agilent 2000 Xシリーズ オシロスコープを使用している場合は、チャンネル1のプローブ減衰比を手動で1:1に設定する必要があります。フロントパネルの[1]キーを押し、さらにProbe (プローブ) ソフトキーを押します。新しいProbe (プローブ) ソフトキーを押し、Entryノブを回して減衰比を1.00:1に設定します。
- 5 フロントパネルの[WaveGen]キー (チャンネル1 V/divノブのすぐ上) を押します。
- 6 Settings (設定) ソフトキーを押し、さらにDefault Wave Gen (デフォルト波形発生) ソフトキーを押します。

オシロスコープの[Default Setup]によってWaveGenの設定が変更されることはありません。このため、誰もが同じ開始点から始められるようにするためには、ジェネレータの設定をデフォルトに戻す必要もあります。

- 7 フロントパネルの[WaveGen]キーをもう一度押します。
- 8 チャンネル1のV/div設定を100 mV/divに設定します。
- 9 オシロスコープのタイムベースを100.0 μs/div (デフォルト設定) に設定します。

オシロスコープには、図24のような正弦波の1サイクルが表示されているはずです。WaveGenのデフォルト信号は、p-p振幅が500 mVの1.000 kHz正弦波です。今度は、信号に変更を加えます。

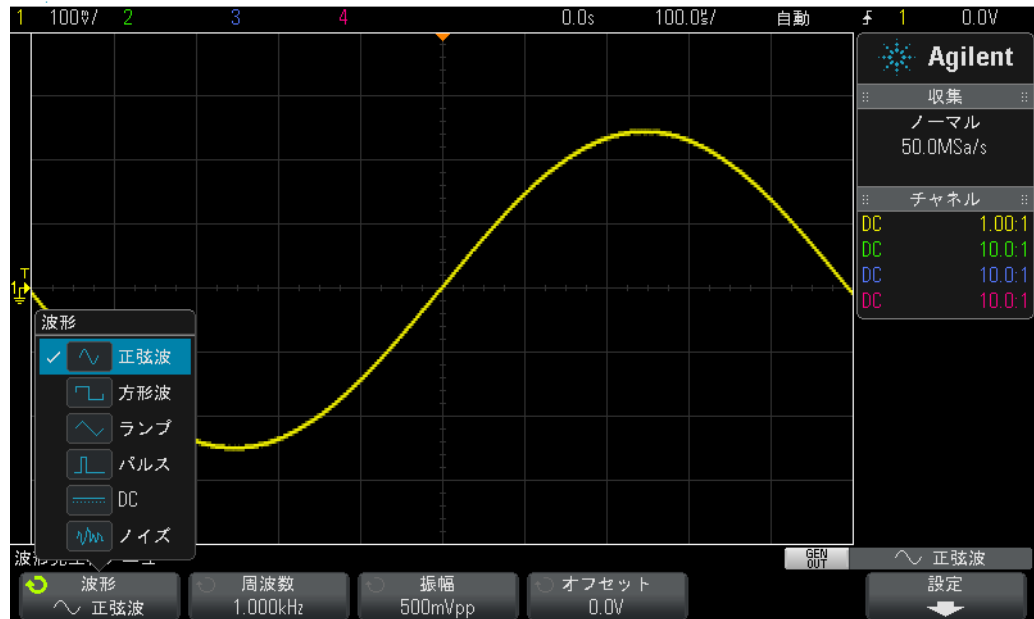
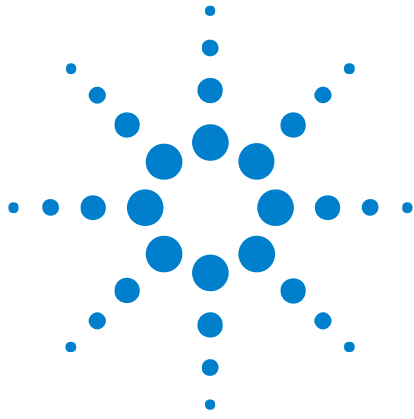


図24 オシロスコープに内蔵されたWaveGenファンクション・ジェネレータの使用方法

- 10 **Frequency** (周波数) ソフトキーを押し、**Entry** ノブを回して周波数を増減します。最大周波数設定は20.00 MHzです。
 - 11 **Amplitude** (振幅) ソフトキーを押し、**Entry** ノブを回してこの信号の振幅を変更します。
 - 12 **Offset** (オフセット) ソフトキーを押し、**Entry** ノブを回してこの信号のオフセットを変更します。
 - 13 **Waveform** (波形) ソフトキーを押し、**Entry** ノブを回して各種波形形状を選択します。
- Square** (方形波) を選択した場合は、**Duty Cycle** (デューティサイクル) も調整できます。
Pulse (パルス) を選択した場合は、パルス幅を調整できます。ここから先は、ジェネレータの出力をオシロスコープに直接接続することはおそらくありません。通常ジェネレータの出力は回路の入力に接続します。さらに、オシロスコープとプローブを使用して、回路の入出力をモニタします。



3

高度なオシロスコープ測定ラボ

- ラボ#7：トリガ・ホールドオフを使用したデジタル・バーストでのトリガ 46
- ラボ#8：発生頻度の少ないイベントでのトリガ、捕捉、解析 50
- ラボ#9：シングルショット・イベントの捕捉 54
- ラボ#10：デジタル波形の自動パラメトリック測定 57
- ラボ#11：オシロスコープのズーム・タイムベースを使用したゲートッド測定 63
- ラボ#12：位相遅延測定とリサージュ波形 67
- ラボ#13：オシロスコープの波形演算の使用方法 71
- ラボ#14：アンダーサンプリングに対応するためのピーク検出 75
- ラボ#15：セグメント・メモリを使用したより多くの波形の捕捉 78



ラボ#7：トリガ・ホールドオフを使用したデジタル・バーストでのトリガ

実際のエレクトロニクス環境の信号は、繰り返しのある正弦波や方形波のように単純であることはめったにありません。より複雑な信号でトリガ・ポイント（同期した写真撮影）を設定するには、トリガ・ホールドオフを使用する必要があります。このラボでは、デジタル・パルスのバーストでトリガをかけるために、オシロスコープのトリガ・ホールドオフ機能の使用方法を学びます。

- 1 チャンネル1入力BNCと“Demo1”出力端子を1本のオシロスコープ・プローブで接続します。このプローブのグランド・クリップを中央端子（グランド）に接続します。
- 2 チャンネル2入力BNCと“Demo2”出力端子をもう1本のオシロスコープ・プローブで接続します。このプローブのグランド・クリップを中央端子に接続します。
- 3 オシロスコープのフロント・パネルにある[Default Setup]を押します。
- 4 [Help]を押し、**Training Signals**（トレーニング信号）ソフトキーを押します。
- 5 **Entry**ノブを使って“**Digital Burst**（デジタル・バースト）”信号を選択し、**Output**（出力）ソフトキーを押してオンにします。
- 6 チャンネル1のV/div設定を**1.00 V/div**に設定します。
- 7 この波形をオシロスコープのディスプレイの中央に位置付けるため、チャンネル1のオフセット/位置を約**+1.7 V**に設定します。
- 8 トリガ・レベル・ノブを押して、トリガ・レベルを自動的に約**50 %**レベルに設定します。
- 9 オシロスコープのタイムベースを**20.00 μ s/div**に設定します。

オシロスコープのディスプレイには、[図25](#)のようなトリガをかけられていないように見えるデジタル・パルスの列が表示されているはずですが、オシロスコープは実際には、このデジタルI/Qデータ・ストリーム（実際には、パルスの「バースト」）のランダムな立ち上がりエッジの交差でトリガをかけています。しかし、このI/Q信号上に一意のトリガ・ポイントを設定するようにオシロスコープをセットアップしていないので、バースト動作は「確認」できません。このため、今度は、バーストのシングルショットを表示できるように繰り返し収集を「停止」して、測定をいくつか実行します。次に、各バーストの最初のパルスにトリガを同期させるために、これらの測定を使用して特定のトリガ・ホールドオフ時間を入力します。

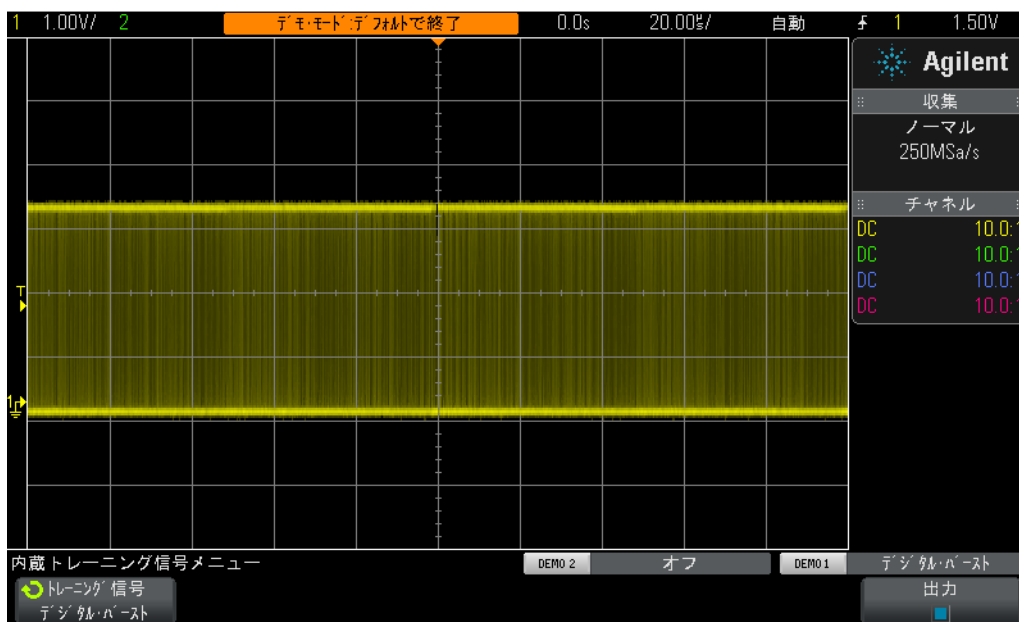


図25 オシロスコープのデフォルトのトリガ設定条件を使用したパルス・バーストの表示

10 フロントパネルの[Run/Stop]キーを押して、繰り返し収集を停止します。

繰り返し収集が停止されているので、デジタル・バースト動作を確認できるはずですが(図26を参照)。すなわち、負のパルスの列の後に短い信号デッドタイム(ハイレベル)が続き、それが繰り返されています。[Single]を数回押した場合は、各収集のトリガ・イベント(画面中央に最も近い立ち上がりエッジ)がバースト内の別のパルスであることがわかるはずですが。

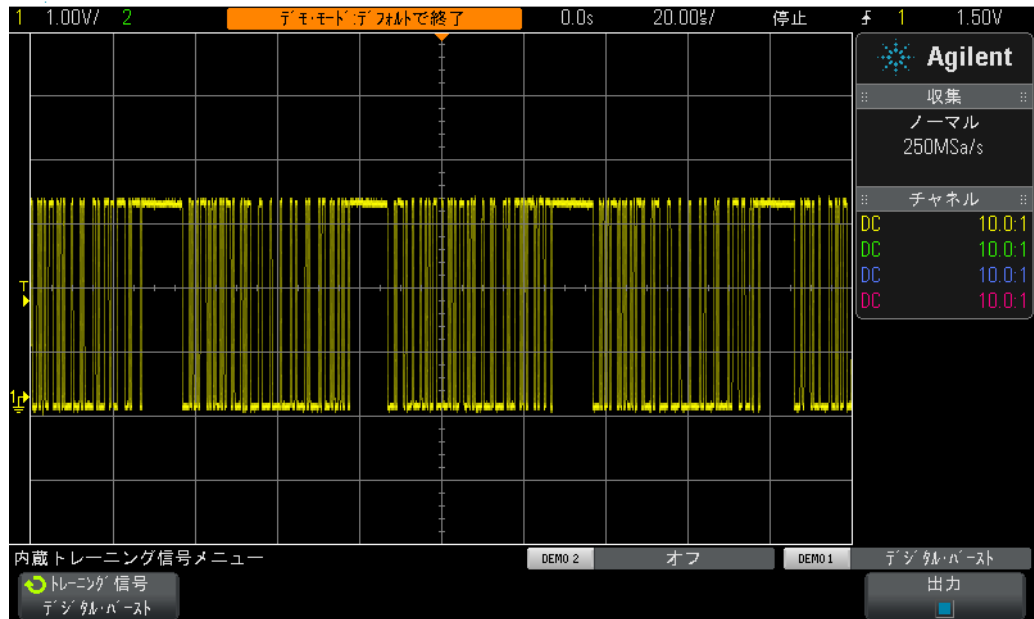


図26 デジタル・バースト入力信号でのランダムなエッジ・トリガ

ラボ#1で学んだことを踏まえて、1つのバースト・パルスの幅を評価するか、オシロスコープのタイミング・カーソル (X1とX2) を使用して測定します。また、1つのバースト・パルスの先頭から次のバースト・パルスの先頭までの時間も測定します。各バーストの幅が約40 μs であること、バースト間の時間が約50 μs であることがわかるはずですが。

オシロスコープのデフォルト・トリガ条件を使用した場合は、オシロスコープはこの信号の「いずれか」のエッジでランダムにトリガをかけます。すなわち、オシロスコープは、バーストの最初のエッジでトリガをかけることもあれば、バーストの11番目のエッジでトリガをかけることも、5番目のエッジでトリガをかけることもあります。理想の同期ポイントは、ランダム・エッジではなく、各バーストの最初のエッジで常にトリガをかけるようにオシロスコープをセットアップすることです。これは、オシロスコープの「トリガ・ホールド」機能を使用することによって実現できます。

トリガ・ホールドオフを使用すれば、各バースト・パルス間の信号デッドタイム中は常にトリガをアーミング状態にするように、オシロスコープに指示することができます。これにより、オシロスコープは常にアーミング後の次の立ち上がりエッジ (常に各バーストの最初のエッジ) でトリガをかけます。40 μs (バーストの幅) ~ 50 μs (バースト間の時間) の間ぐらいのトリガ・ホールドオフ時間が、これを実現するのに理想的なホールドオフ時間です。これではわかりにくいので、まずはやってみて、どうなるか確認してみましょう。

11 フロントパネルの[Run/Stop]キーを押して、繰り返し収集を再開します。

12 フロント・パネルのTriggerセクションにある[Mode/Coupling]キーを押します。

13 Holdoff (ホールドオフ) ソフトキーを押し、ホールドオフ値が約**45.000 μs** に設定されるまで、**Entry**ノブを時計回りに回します。

図27のような同期画面が表示されているはずですが。オシロスコープは、バースト・パルスの最初の立ち上がりエッジ (画面中央) でトリガをかけ、**45.00 μs** (ホールドオフ時間) の間トリガをオフにします。このホールド時間中は、オシロスコープは、2番目、3番目、4番目などの交差を無視し、バーストが終了してから次のバーストが開始するまでの間 (信号の「デッドタイム」中) に、トリガを再アームします。次の有効なトリガ・イベントもやはり、次のバーストの最初の立ち上がりエッジです。



図27 オシロスコープのトリガ・ホールドオフ機能を使用したバースト・パルスでの同期

ラボ#8：発生頻度の少ないイベントでのトリガ、捕捉、解析

このラボでは、発生頻度の少ないグリッチの表示機能を拡張するために、オシロスコープの各種残光表示モードの使用方法を学びます。さらに、オシロスコープのパルス幅トリガ・モードを使用したグリッチでのトリガ方法を学びます。

- 1 チャンネル1入力BNCと“Demo1”端子を1本のオシロスコープ・プローブで接続します。このプローブのグランド・クリップを中央端子（グランド）に接続します。
- 2 オシロスコープのフロント・パネルにある[Default Setup]を押します。
- 3 [Help]を押し、**Training Signals**（トレーニング信号）ソフトキーを押します。
- 4 **Entry**ノブを使って“**Clock with Infrequent Glitch**（発生頻度の少ないグリッチのあるクロック）”信号を選択し、**Output**（出力）ソフトキーを押してオンにします。
- 5 チャンネル1のV/div設定を**500 mV/div**に設定します。
- 6 この波形を画面中央に表示するために、チャンネル1の位置／オフセットを**1.00 V**に設定します。
- 7 トリガ・レベルを自動的に約**50 %**（～1.0 V）に設定するために、トリガ・レベル・ノブを押します。
- 8 オシロスコープのタイムベースを**20.00 ns/div**に設定します。

この時点で、発生頻度の少ないかすかな「ちらつき」が画面中央付近に見られる場合があります。これは、オシロスコープが捕捉している発生頻度の少ないグリッチ（高速パルス）です。オシロスコープは、通常はクロック信号の立ち上がりエッジでトリガをかけますが、この発生頻度の少ない立ち上がりエッジでトリガをかけることもあります。このグリッチがかすんで見える理由は、オシロスコープが発生頻度の高い信号は明るく表示し、発生頻度の少ない信号は薄暗く表示するためです。このため、このグリッチがあまり頻繁に発生しないことがわかります。

- 9 小さな[Intensity]ボタン（**Entry**ノブの下）を押し、輝度が**100%**に調整されるまで、**Entry**ノブを時計回りに回します。

波形輝度を**100 %**に調整すれば、オシロスコープは捕捉した波形をすべて同じ輝度で表示するため、この発生頻度の少ないグリッチがはっきりと表示されます（図28を参照）。いずれかのエッジでトリガをかけながら（デフォルトのトリガ・タイプ）、このような発生頻度の少ないイベントを捕捉するには、超高速の波形更新レートを備えた（高速写真撮影）オシロスコープを使用する必要があります。今度は、このグリッチの表示機能をさらに高めるオシロスコープの特殊な表示モードをいくつか試してみます。

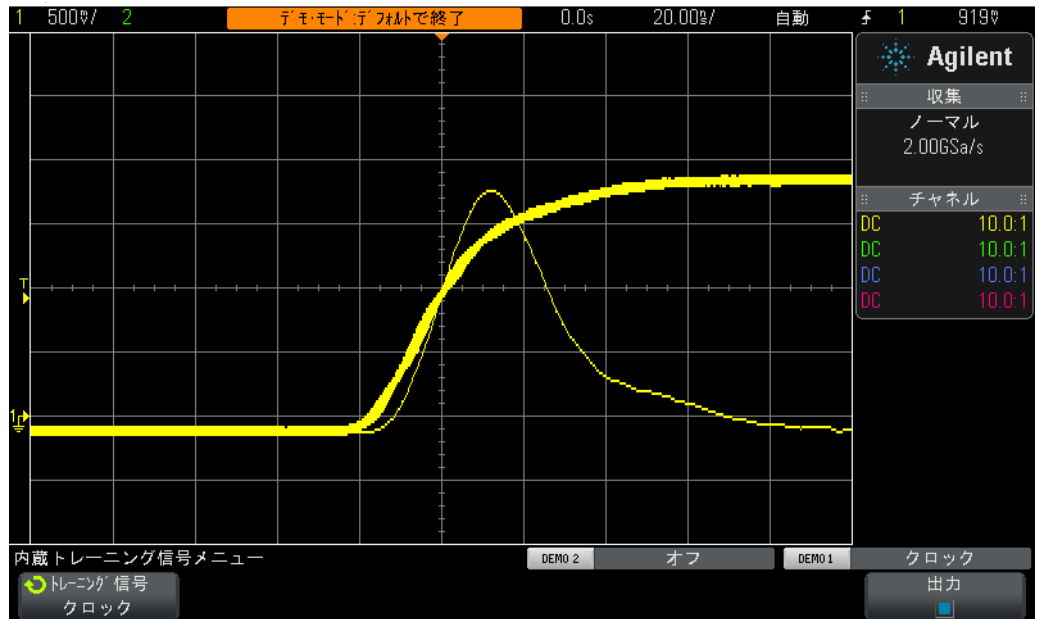


図28 発生頻度の少ないグリッチの捕捉も可能なオシロスコープの高速波形更新レート

10 フロントパネルの[Display]キー (Cursors (カーソル) ノブの下) を押します。

11 **Persistence** (残光表示) ソフトキーを押し、**Entry** ノブを使って **Infinite Persistence** (∞ 残光) 表示モードを選択します。

無限残光表示をオンにすれば、オシロスコープは捕捉したすべての波形を重ね合わせて表示します (消去されません)。無限残光表示をオンにしない場合、オシロスコープは捕捉したすべての波形を60 Hzレートで消去します。2時間に一度ほど発生するグリッチなど、非常に発生頻度の少ないイベントを捕捉する場合は、無限残光表示を使用するのが極めて有効です。例えば、グリッチが発生するかどうか確認するために夜通しテストを行い、翌朝ラボに戻ったときにグリッチが発生したかどうか調べることができます。また無限残光表示モードは、ワーストケースのタイミング・ジッタ/ノイズを捕捉/表示する場合にも有用です。このオシロスコープでは、無限残光表示モードに加えて、波形表示の消去レートを定義できる可変残光表示モードも使用できます。

今度は、オシロスコープの**Pulse Width**タイプのトリガを使用して、この発生頻度の少ないグリッチでトリガをかけるようにオシロスコープを設定します。まず、このパルスの近似幅をトリガ・レベル設定 (約+1.0 Vに設定されているはず) を基準にして目視で見積もりますが、パルス幅は30 ns程度に見えるはず。

12 **Persistence** (残光表示) ソフトキーを押し、**Off** (オフ) を選択して残光表示モードをオフにします。

13 **Clear Persistence** (クリア無限持続) ソフトキーを押します。

14 フロントパネルの[Trigger]キーを押します。

15 **Trigger** (トリガ) ソフトキーを押し、**Entry**ノブを回して、デフォルトの**Edge** (エッジ) タイプのトリガから**Pulse Width** (パルス幅) タイプのトリガに変更します。

16 **<30 ns** ソフトキーを押し、**Entry**ノブを回して、パルス幅時間を**<30 ns**から**<50 ns**に変更します。

Agilentの2000 Xシリーズのオシロスコープを使用している場合、グリッチが発生しているだけの安定した表示が得られているはずですが、Agilentのより高性能な3000 Xシリーズのオシロスコープを使用している場合は、グリッチだけでなく、自動的にトリガがかかります。これは、これらのオシロスコープではグリッチが発生する頻度があまりにも少なく、デフォルトの自動トリガ・モードが有効になるためです。したがって、ノーマル・トリガ・モードを使用しなければならない典型的なケースです (ノーマル・トリガ・モードでは、オシロスコープは、トリガ・イベントが発生するのを待ち、自動/非同期トリガを発生させることはありません)。Agilent InfiniiVision 2000 Xシリーズと3000 Xシリーズのいずれのオシロスコープを使用しているかに関わらず、ノーマル・トリガ・モードを選択します。

17 フロント・パネルのTriggerセクションにある[Mode/Coupling]キーを押します。

18 **Mode** (モード) ソフトキーを押し、**Entry**を回して**Normal**トリガ・モードを選択します。

図29のような急峻なグリッチが発生しているだけの安定した表示が得られているはずですが、パルス幅タイプのトリガでは、トリガをかける負のパルスまたは正のパルスの固有の幅を定義できます。時間変数には、タイム・レンジ“><”に加えて、“<”、“>”も使用できます。実際のトリガ・ポイントは、タイム・クォリファイ・パルスの終わりに発生します。この例では、幅が**50 ns**未満の正のパルスでトリガをかけるようにオシロスコープをセットアップしたので、オシロスコープは~**30 ns**幅のパルスの立ち下がりエッジでトリガをかけます。この**30 ns**パルスより急峻なグリッチがないことを確認したい場合は、[Trigger]メニューを選択し、パルス幅時間値を最小設定に再調整して、オシロスコープがトリガをかけることがあるか確認します。

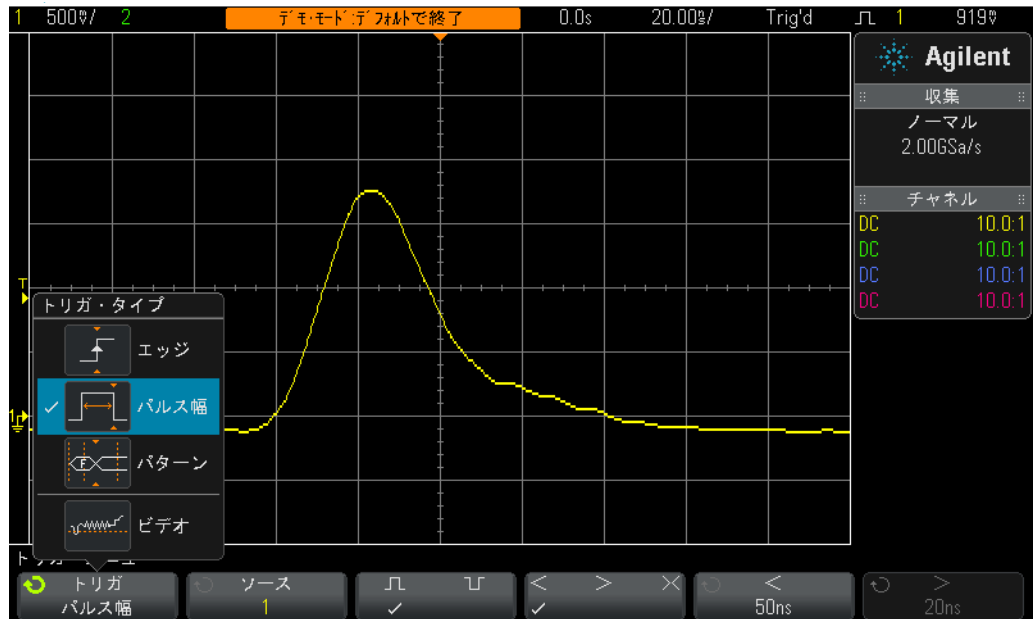


図29 パルス幅トリガを使用した高速パルスでのクオリファイ

パルス幅トリガは、不要なグリッチでのトリガに有用だけでなく、デジタル・パルス列の一部にトリガ・ポイントを設定するのにも役立ちます。

ラボ#9：シングルショット・イベントの捕捉

捕捉したいイベントが真に「シングルショット」であり、一度だけ発生する場合は、イベントを捕捉するようにオシロスコープを設定するために、いくつかの信号特性が既知である必要があります。繰り返し信号を捕捉する場合は、通常、さまざまなセットアップ条件を使用して捕捉した波形を画面上に表示してから、波形が適切にスケールされるまでオシロスコープのスケールを調整することができます。しかし、シングルショット・イベントに関しては、そうした余裕はありません。

そこで、捕捉したいシングルショット・イベントが、振幅が約2.5 Vp-p、オフセットが+1.25 Vのデジタル・パルスであることがわかっていると仮定します。すなわち、この信号はグラウンド (0.0 V) から約+2.5 Vまでスイングするはずですが、おそらくこれは、起動中にだけ発生するシステムのリセット・パルスです。

このため、この信号を捕捉するのに最適な垂直設定は500 mV/divとなります。この設定では、4 Vp-pまでの信号振幅を捕捉できます。波形を画面中央に表示するのに最適なオフセット/位置設定は+1.25 Vとなります。また、標準の立ち上がりエッジ・トリガ条件では、最適なトリガ・レベルも+1.25 Vとなります。

さらに、シングルショット・イベントの幅が約500 nsであることもわかっていると仮定します。このため、最適なタイムベース設定は200 ns/divとなります。この設定では、画面全体の捕捉時間は2.0 μ sとなりますが、500 ns幅のパルスを捕捉するには十分すぎます。次に、このシングルショット・パルスを補足するようにオシロスコープを設定します。

- 1 チャンネル1入力BNCと“Demo1”端子を1本のオシロスコープ・プローブで接続します。このプローブのグラウンド・クリップを中央端子（グラウンド）に接続します。
- 2 オシロスコープのフロント・パネルにある[Default Setup]を押します。
- 3 チャンネル1のV/div設定を500 mV/divに設定します。
- 4 チャンネル1の垂直位置/オフセットを+1.25 Vに設定します。
- 5 トリガ・レベルを+1.25 Vに設定します。
- 6 オシロスコープのタイムベースを200.0 ns/divに設定します。
- 7 フロントパネルの[Mode/Coupling]キー（トリガ・レベル・ノブの隣）を押します。
- 8 Mode（モード）ソフトキーを押し、Auto（自動）からNormal（ノーマル）に変更します。

シングルショット・イベントの捕捉には、Normalトリガ・モードを使用しなければなりません。デフォルトのAutoトリガ・モードのままでは、オシロスコープは非同期トリガを自動的に発生させ続けるため、シングルショット・イベントでのトリガを見逃してしまいます。Normalトリガ・モードでは、必ず有効なトリガ・イベント（この場合、+1.25 Vでの立ち上がりエッジ）が発生するのを待ってから、捕捉/表示を開始します。オシロスコープは現在、正しく設定され、シングルショット・イベントの発生を待っているはずですが、それでは、シングルショット・イベントを発生させてみましょう。

- 9 [Help]を押し、**Training Signals** (トレーニング信号) ソフトキーを押します。
- 10 **Entry** ノブを使って“**Single-shot Pulse with Ringing** (リングングのあるシングルショット・パルス)”信号を選択し、**Output** (出力) ソフトキーを押してオンにします。これによってシングルショット・イベントが発生することはありません。この出力がオンになるだけです。
- 11 次に、**Auto Setup** ソフトキーを押すことは**しない**でください。**Auto Setup**を選択すれば、今行った設定が上書きされます。この機能が有効なのは、特定のシングルショット・トレーニング信号を捕捉するようにオシロスコープを設定する場合だけです。任意のシングルショット信号(シミュレーション対象)を捕捉するようにオシロスコープを設定する場合には使用できません。
- 12 **Transmit Single-shot** (送信シングルショット) ソフトキーを押して、シングルショット・イベントを発生させます。

オシロスコープはこのシングルショット・イベントを捕捉し、オシロスコープのディスプレイには図30のような画面が表示されているはずです。**Transmit Single-shot** (送信シングルショット) ソフトキーを押すたびに、オシロスコープはシングルショット・イベントを同様に捕捉します。このイベントを捕捉するために、オシロスコープの**Normal**トリガ・モードを**Run**収集モードで使用してきました。今度は、オシロスコープの**Single**収集モードを使用します。

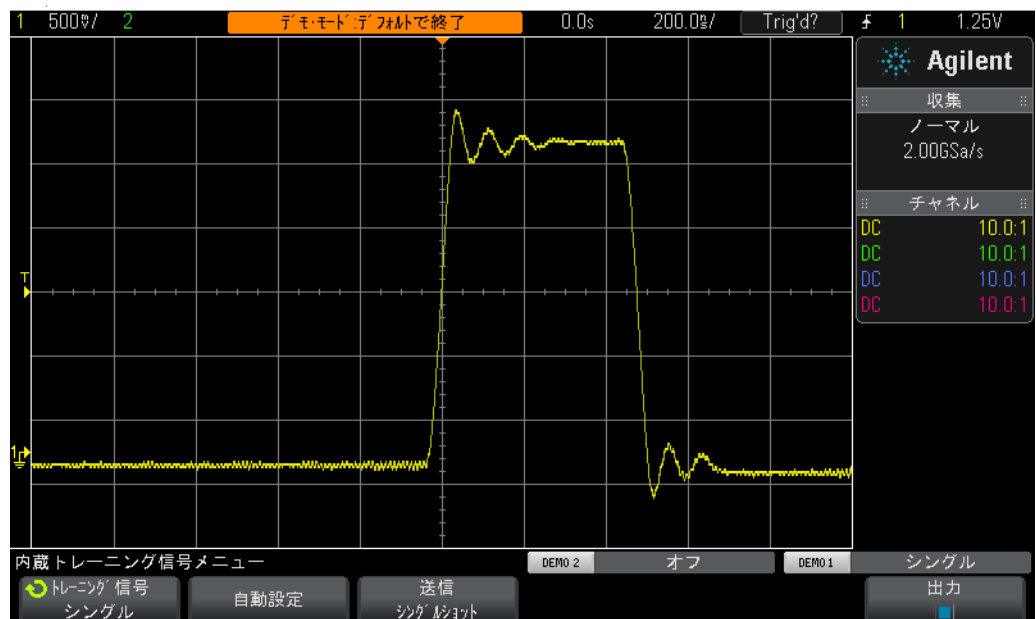


図30 シングルショット・イベントを捕捉するためのオシロスコープの設定

- 13 オシロスコープのフロント・パネルの右上コーナにある**[Single]**キーを押します。
- 14 今度は、**Transmit Single-shot** (送信シングルショット) ソフトキーを押します。

3 高度なオシロスコープ測定ラボ

Single収集モードを使用した場合、オシロスコープはシングルショット・イベントを一度だけ捕捉します。別のシングルショット・イベントを捕捉するようにオシロスコープを再アーミングするには、(シングルショットの発生前に) **[Single]**をもう一度押します。**Single**収集モードでは、**Normal**トリガ・モードが自動的に選択されます。

ラボ#10 : デジタル波形の自動パラメトリック測定

このオシロスコープ・トレーニング・ガイドのラボ#1で、目盛りを数えた後でオシロスコープのスケーリング係数を乗算するか、オシロスコープのカーソル機能を使用することによって、電圧/タイミング測定を実行する方法を学びました。今度は、これらの測定をより迅速かつ正確に実行するために、オシロスコープの自動パラメトリック測定機能の使用方法を学びます。

- 1 チャンネル1入力BNCと“Demo1”端子を1本のオシロスコープ・プローブで接続します。このプローブのグランド・クリップを中央端子（グランド）に接続します。
- 2 オシロスコープのフロント・パネルにある[Default Setup]を押します。
- 3 [Help]を押し、**Training Signals**（トレーニング信号）ソフトキーを押します。
- 4 **Entry**ノブを使って“**Repetitive Pulse with Ringing**（リングングのある繰り返しパルス）”信号を選択し、**Output**（出力）ソフトキーを押してオンにします。
- 5 チャンネル1のV/div設定を**500 mV/div**に設定します。
- 6 チャンネル1の位置/オフセットを**1.40 V**に設定します。
- 7 トリガ・レベルを自動的に約**50 %**（～1.3 V）に設定するために、トリガ・レベル・ノブを押します。
- 8 オシロスコープのタイムベースを**500.0 ns/div**に設定します。

この時点では、[図31](#)のようなオーバシュートやリングングが存在する繰り返しデジタル・パルスが表示されているはずです。

3 高度なオシロスコープ測定ラボ

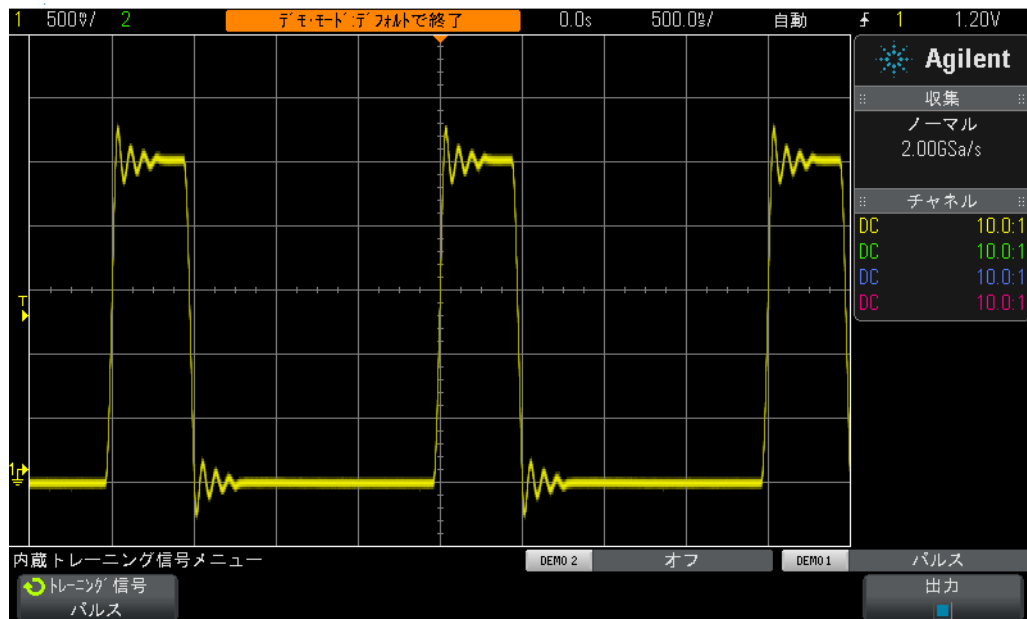


図31 リンギングやオーバーシュートが存在する繰り返しデジタル・パルスを捕捉／表示するためのオシロスコープの設定

9 フロントパネルの[Meas]キー（Cursors（カーソル）ノブの隣）を押します。

デフォルト設定から始めた場合（これまでと同様）は、[Meas]キーを押すと、オシロスコープは自動的に周波数/Vp-p測定をオンにします。このオシロスコープは常に更新される測定値を4つまで表示できるので、これにさらに2つの測定を追加してみましょう。

10 **Type**（タイプ）ソフトキーを押し、矢印がVoltageの**Maximum**（最大値）を指すまで**Entry**ノブを回します。

11 次に、**Entry**ノブを押してこの測定を選択するか、**Add Measurement**（追加測定）ソフトキーを押します。レベル・インジケータによって、この測定が実行されている場所が表示されています。

12 矢印がVoltageの**Minimum**（最小値）を指すまで**Entry**ノブをもう一度回し、**Entry**ノブを押します。

オシロスコープのディスプレイには、図32のような画面が表示され、連続的に更新される4つの測定値（周波数、Vp-p、Vmax、Vmin）が表示されます。Agilent 3000 Xシリーズオシロスコープを使用している場合は、各測定の統計も常に最新の状態で表示されます。次に、4種類のパルス・パラメータ測定を実行するようにオシロスコープを設定します。

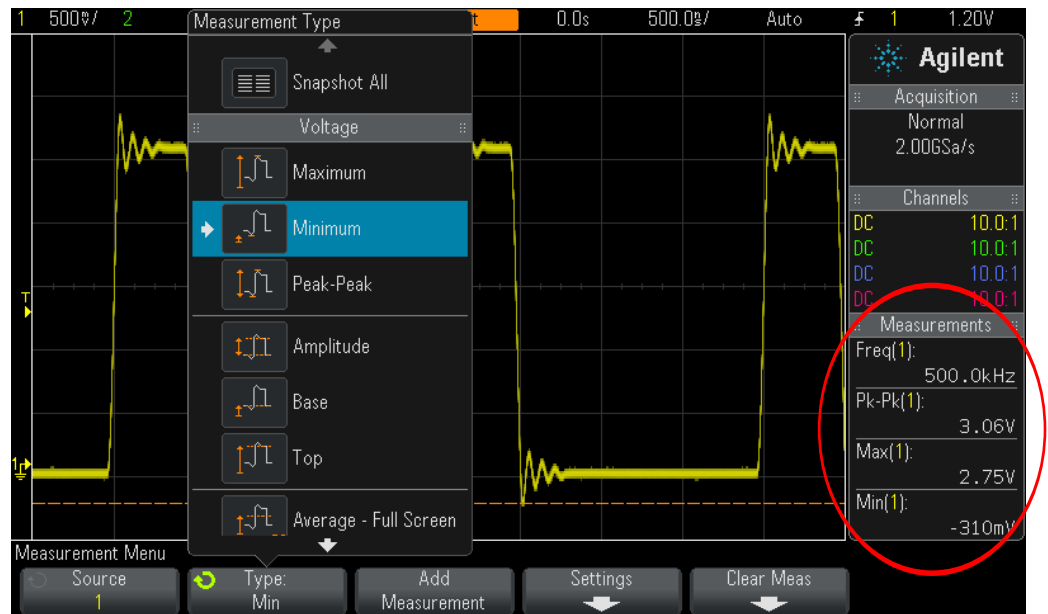


図32 オシロスコープによる最大4つのパラメトリック測定の自動実行

- 13 **Clear Meas** (測定クリア) ソフトキーを押してから、**Clear All** (クリアすべて) ソフトキーを押します。
- 14 オシロスコープのタイムベースを**200.0 ns/div**に設定します。パルスを拡大すると、測定分解能が高くなります。
- 15 今度は、**Top** (トップ)、**Base** (ベース)、**Rise Time** (立ち上がり時間)、**Fall Time** (立ち下がり時間) の測定を選択します。

オシロスコープのディスプレイには、図33のような画面が表示されているはずですが、最後に選択した測定が**Fall Time**の場合は、カーソルはこの測定の実行位置を示します。

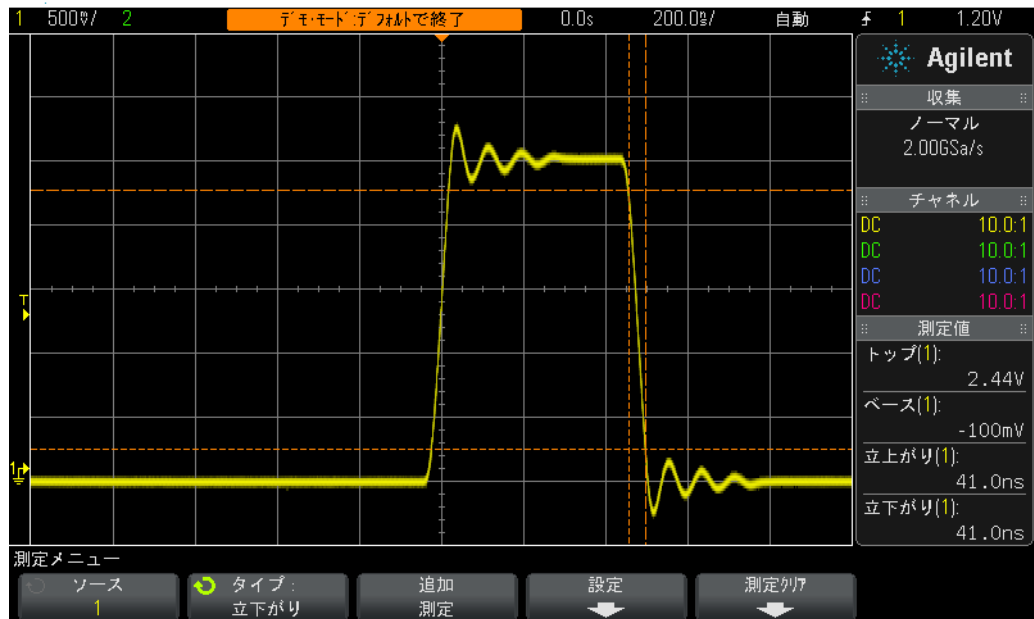


図33 デジタル・パルスのパルス・パラメータの測定

ここで、波形の「トップ」(Vtop)と波形の「最大値」(Vmax)の違い、波形の「ベース」(Vbase)と波形の「最小値」(Vmin)の違いは何だろうとされているかもしれません。

Vtopは、波形の定常状態のハイレベルです。これは、オーバシュート／リングングのセトリング後の波形の電圧レベルです。同様に、Vbaseは波形の定常状態のローレベルです。デジタル・パルス・パラメータ測定では、多くの場合、オーバシュートのピーク値である波形の最大電圧／最小電圧 (Vmax/Vmin) よりも、VtopとVbaseの方が重要なパラメータです。

立ち上がり時間測定と立ち下がり時間測定は、相対遷移時間です。つまり、特定の電圧しきい値レベルを基準にして実行されています。オシロスコープのこれらの測定のデフォルトのしきい値レベルは、VbaseとVtopを基準にして10%レベルと90%レベルです。すなわち、Vbaseは0%レベル、Vtopは100%レベルと見なされます。ただし、今日の多くの高速デバイスでは、20%と80%のしきい値レベル、あるいは前後±1.0Vといった絶対電圧レベルを基準にした立ち上がり時間と立ち下がり時間が仕様化されています。今度は、このパルスの立ち上がり時間を20%と80%のしきい値レベルを基準にして測定するように、オシロスコープを設定します。

16 Clear Meas (測定クリア) ソフトキーを押してから、**Clear All** (クリアすべて) ソフトキーを押します。

17 Setting (設定) ソフトキーを押してから、**Thresholds** (しきい値) ソフトキーを押します。

18 Lower (下限) ソフトキーを押し、表示値が20%になるまでEntryノブを回します。

- 19 **Upper** (上限) ソフトキーを押し、表示値が**80%**になるまで**Entry**ノブを回します。
- 20 前のメニューに戻るには、**(Back)** フロントパネル・キー (電源スイッチのすぐ上) を押します。
- 21 2レベル下位のメニューが表示されていたので、**(Back)** キーをもう一度押します。
- 22 **Type** (タイプ) ソフトキーを押し、矢印が**Rise Time** (立ち上がり時間) をポイントするまで汎用入力ノブを回します。
- 23 今度は、**Add Measurement** (追加測定) ソフトキーを押すか、**Entry**ノブを押してこの測定を追加します。

これらのユーザ定義の測定しきい値レベル (20 %と80 %) を使用すれば、立ち上がり時間測定が高速化されます。これは、短い波形セグメントで測定を行っているためです (図34を参照)。現在の読み値は約30 nsです。オシロスコープのデフォルトしきい値レベル (10 %/90 %) を使用した場合は、読み値が約40 nsになるはずですが。

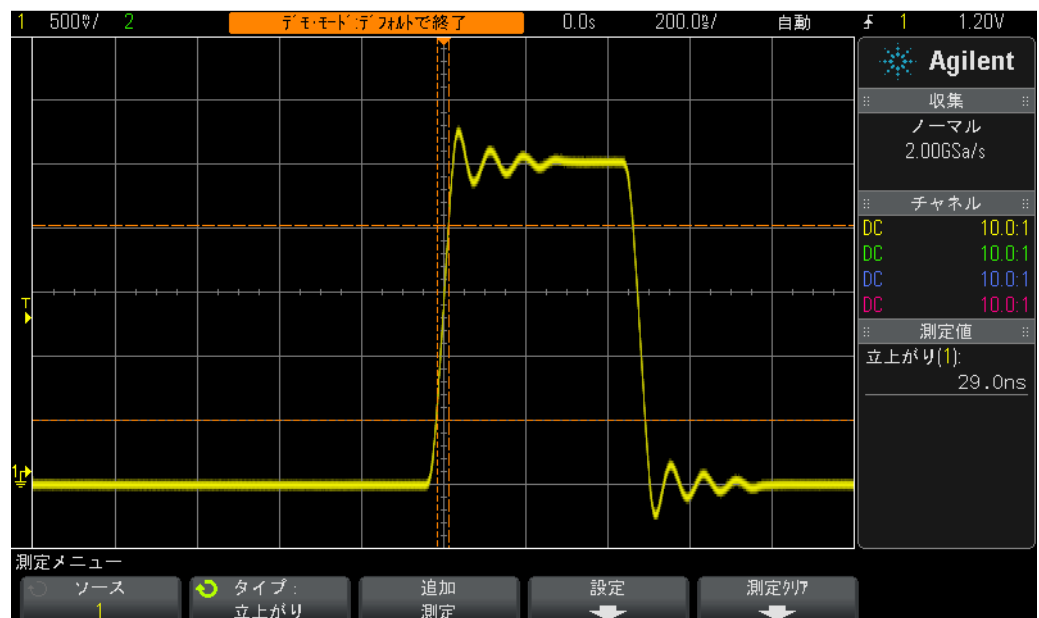


図34 20 %と80 %のしきい値レベルを基準にした立ち上がり時間の測定

このラボのステップ#14で、波形を拡大すると測定分解能と確度が高くなると説明しました。タイムベースを50.0 $\mu\text{s}/\text{div}$ に設定すれば、測定分解能が低下することがわかります。

このラボを終了する前に、もう1つ測定を実行してみましょう。ただし、今回は、この波形のより広範囲にわたる測定を実行します。

3 高度なオシロスコープ測定ラボ

24 オシロスコープのタイムベースを**500.0 ns/div**に設定します。

25 **Type** (タイプ) ソフトキーを押し、矢印が**Snapshot All** (全スナップショット) (リストの上端) を指すまで**Entry** ノブを回します。

26 今度は、**Add Measurement** (追加測定) ソフトキーを押すか、**Entry** ノブを押してこの一連の測定を追加します。

「全スナップショット」測定では、入力信号の特性を徹底的に評価するために、複数のパラメータの単発 (スナップショット) 測定が実行されます (図35を参照)。この一連の測定は連続的に更新されないため、いずれかのフロントパネル・キーまたはソフトキーを押すと、これらの測定は表示されなくなります。

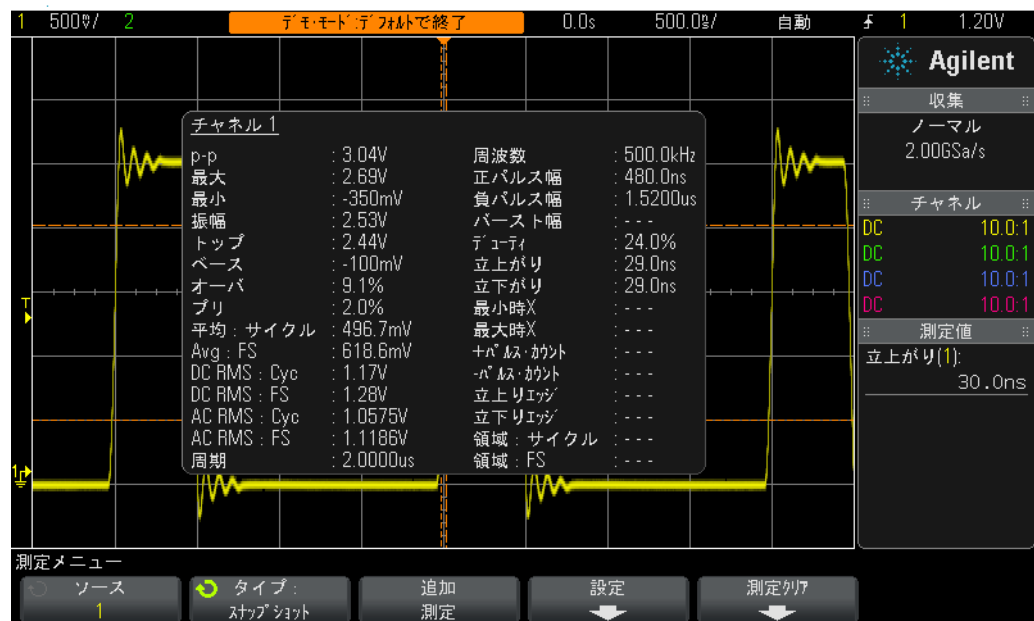


図35 「全スナップショット」機能を使用した包括的な自動パラメトリック測定

ラボ#11：オシロスコープのズーム・タイムベースを使用した ゲーテッド測定

単純な正弦波や方形波などの繰り返し信号に対して、正のパルス幅測定などの自動パラメトリック測定を実行する場合は、オシロスコープがどのパルスの測定を行うかは問題ではありません。どのパルスも同じです。しかし、プロービングする入力信号がより複雑な場合や、各パルスが固有のパラメトリック特性を持つ場合はどうでしょうか？この場合は最初に、複雑な信号のあるポイントでトリガするようにオシロスコープを設定する必要があります。次に、測定するパルスを慎重に選択するように、オシロスコープの測定を設定する必要があります。このラボでは、オシロスコープのズーム・タイムベース・モードを使用して、特定の選択したパルスを測定（「ゲーテッド」測定）する方法を学びます。

- 1 チャンネル1入力BNCと“Demo1”端子を1本のオシロスコープ・プローブで接続します。このプローブのグランド・クリップを中央端子（グランド）に接続します。
- 2 オシロスコープのフロント・パネルにある[Default Setup]を押します。
- 3 [Help]を押し、**Training Signals**（トレーニング信号）ソフトキーを押します。
- 4 **Entry**ノブを使って“**Digital Burst with Infrequent Glitch**（発生頻度の少ないグリッチのあるデジタル・バースト）”信号を選択し、**Output**（出力）ソフトキーを押してオンにします。
- 5 チャンネル1のV/div設定を**1.0 V/div**に設定します。
- 6 この波形を画面中央に表示するために、チャンネル1の位置／オフセットを**2.0 V**に設定します。
- 7 トリガ・レベルを自動的に約**50 %**（～1.7 V）に設定するために、トリガ・レベル・ノブを押します。
- 8 オシロスコープのタイムベースを**1.000 μ s/div**に設定します。

この設定では、波形に若干の「ちらつき」が見られる場合があります。この「ちらつき」は、バースト・パルスの前に発生するゴースト波形のように見える場合があります。オシロスコープの波形輝度を**100 %**にすれば、より鮮明になります。「ちらつき」の原因は、通常はこのデジタル・バーストの最初の立ち上がりエッジでトリガをかけるオシロスコープが、時々それ以降のエッジでトリガをかけることにあります。オシロスコープがバーストの最初の立ち上がりエッジでだけトリガをかけるようにするには、オシロスコープのトリガ・ホールド機能を使用する必要があります。

- 9 トリガ・レベル・ノブ付近にあるフロントパネルの[**Mode/Coupling**]キーを押します。
- 10 **Holdoff**（ホールドオフ）ソフトキーを押し、**Entry**ノブを時計回りに回して、トリガ・ホールドオフ値を**4.000 μ s**に設定します。

オシロスコープのトリガ・ホールドオフ機能をオンにし、**4.0 μ s**に設定したので、オシロスコープはバーストの最初の立ち上がりエッジでトリガをかけ、**4.0 μ s**の間トリガのアーミングを解除し、バーストの最後のパルスが終了した後にトリガを再アーミングします。このため、バーストの次の繰り返し期間の最初のパルスで再びトリガをかけられるようになります。トリガ・ホールドオフを使用して、この複雑なデジタル信号に安定したトリガ・ポイントを設定しました。

3 高度なオシロスコープ測定ラボ

幅の異なる6つの正のパルスがあり、6番目のパルスの後に発生頻度の少ないグリッチが生じていることがわかります(図36を参照)。今度は、「正パルス幅」測定をオンにします。

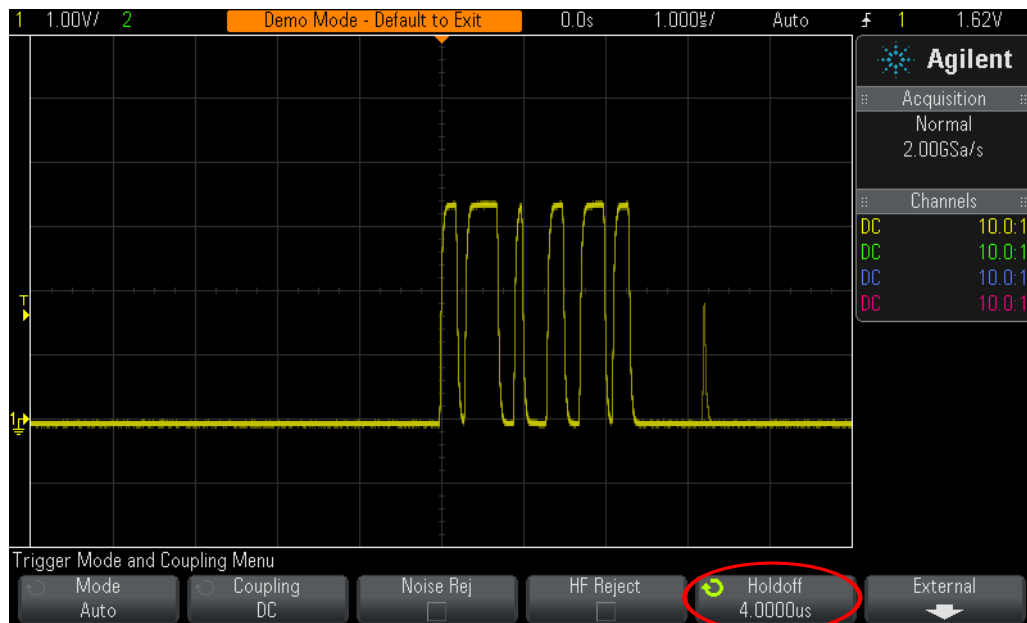


図36 パルス幅の異なるデジタル・パルスのバーストを捕捉するためのオシロスコープの設定

- 11 フロントパネルの[Meas]キー (Cursors (カーソル) ノブの隣) を押します。
- 12 **Clear Meas** (測定クリア) ソフトキーを押してから、**Clear All** (クリアすべて) ソフトキーを押します。
- 13 **Type** (タイプ) ソフトキーを押し、**Entry**ノブを使って**+ Width** (正パルス幅) 測定を選択します。
- 14 **Entry**ノブを押すか、**Add Measurement** (追加測定) ソフトキーを押してこの測定を選択します。

オシロスコープは常に、画面中央に最も近い位置にあるパルスの測定を実行します。この場合は、このデジタル・バーストの最初のパルスの正のパルス幅が測定されます(図37を参照)。では、2番目、3番目、4番目などのパルスの幅を知りたい場合はどうするのでしょうか？

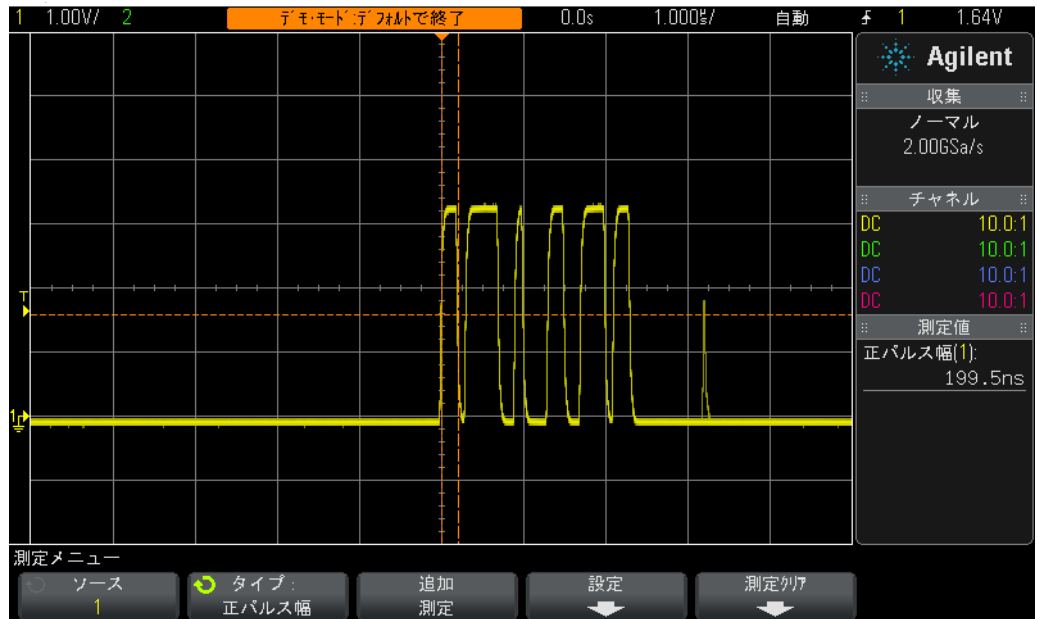


図37 バーストの最初のパルスの正のパルス幅の測定

- 15 フロント・パネルのHorizontal（水平軸）セクションにあるⓄ ボタンを押して、オシロスコープのズーム・タイムベース・モードをオンにします。
- 16 大きいタイムベース・ノブを回して、ズーム・タイムベースを **50.00 ns/div** に設定します。
- 17 水平位置ノブを回して、水平位置を **100.0 ns** に設定します。

ズーム・タイムベースをオンにすれば、水平軸コントロール（s/divと位置）はズーム（拡大）された波形をコントロールします。旧世代のアナログ・オシロスコープの操作に慣れている教授は、この操作モードを遅延掃引と呼ぶことがあります。

3 高度なオシロスコープ測定ラボ

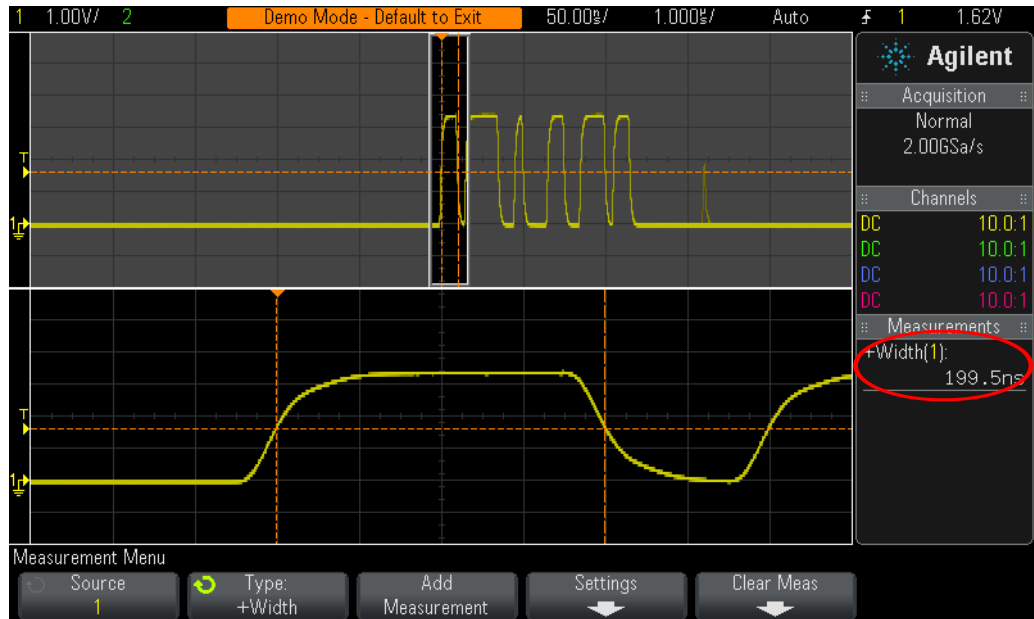


図38 オシロスコープのズーム・タイムベース・モードを使用したゲーテッド測定

図38のように、オシロスコープのディスプレイの下側には、このバーストの最初のパルスが拡大表示されているはずです。また、正パルス幅測定では、最初のパルスの正のパルス幅が測定されているはずです。このパルスの幅はいくつですか？

正パルス幅（最初のパルス） = _____

今度は、2番目のパルスの幅を測定します。

18 2番目のパルス上に「ウィンドウ」を表示するために、水平位置／遅延を500.00 nsに設定します。

2番目のパルスの幅はいくつですか？

正パルス幅（2番目のパルス） = _____

19 各パルス上に「ウィンドウ」を表示して、残りの4つのパルス（発生頻度の少ないグリッチは除く）の幅を測定します。

正パルス幅（3番目のパルス） = _____

正パルス幅（4番目のパルス） = _____

正パルス幅（5番目のパルス） = _____

正パルス幅（6番目のパルス） = _____

ラボ#12：位相遅延測定とリサージュ波形

このラボでは、位相遅延正弦波の2チャンネル測定の実行方法を学びます。反転増幅器の位相応答を確認したい場合は、この測定で確認することができます。このラボでは、入力と出力間の位相応答の測定方法を説明します。さらに、これらの波形をリサージュ曲線で表示する方法も学びます。

- 1 Demo1/Demo2端子とチャンネル1/チャンネル2入力BNCの間がそれぞれ、2本のオシロスコープ・プローブで接続されていることをもう一度確認します。
- 2 オシロスコープのフロント・パネルにある[Default Setup]を押します。
- 3 フロントパネルの[2]キーを押して、チャンネル2をオンにします。
- 4 [Help]を押し、**Training Signals**（トレーニング信号）ソフトキーを押します。
- 5 **Entry**ノブを使って“**Phase Shifted Sine**（位相シフト正弦波）”信号を選択し、**Output**（出力）ソフトキーを押してオンにします。
- 6 チャンネル1のV/div設定を**500 mV/div**に設定します。
- 7 チャンネル2のV/div設定を**500 mV/div**に設定します。
- 8 オシロスコープのタイムベースを**200.0 μ s/div**に設定します。

この時点では、2つの正弦波が表示されているはずですが、チャンネル2で捕捉された正弦波は、チャンネル1で捕捉された正弦波から約90度遅延しています（図39を参照）。今度は、オシロスコープの2チャンネル自動測定を使って、遅延時間と位相シフトを測定します。

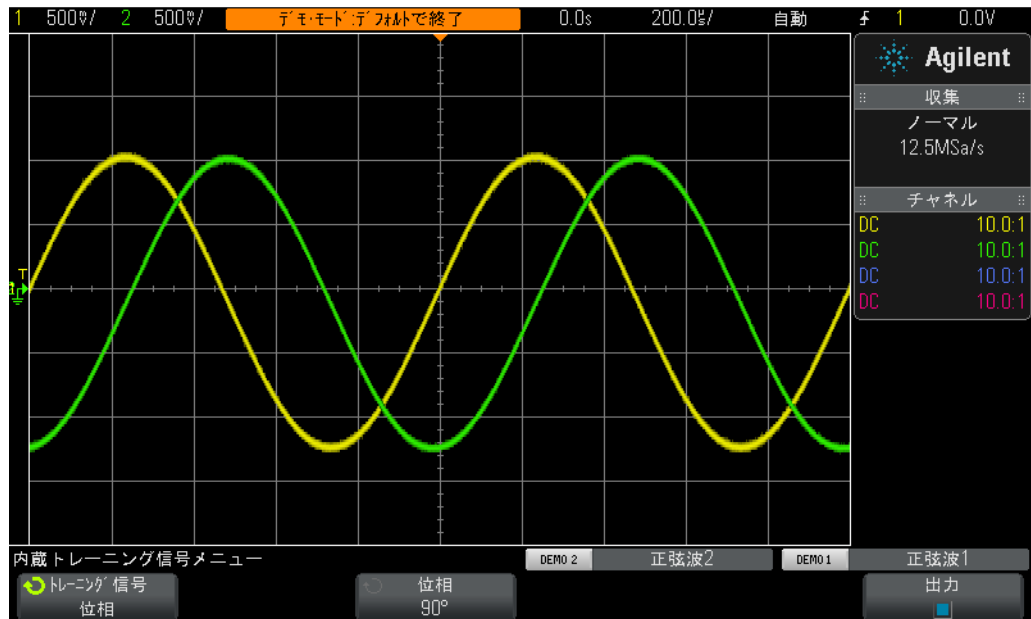


図39 位相遅延信号の測定

- 9 フロントパネルの[Meas]キー (Cursors (カーソル) ノブの隣) を押します。
- 10 **Type** (タイプ) ソフトキーを押し、**Entry** ノブを使って **Delay** (遅延) 測定をポイントします。
- 11 **Add Measurement** (追加測定) ソフトキーを押すか、**Entry** ノブを押してこの測定を追加します。
- 12 **Entry** ノブを使って **Phase** (位相) 測定に移動します。
- 13 **Add Measurement** (追加測定) ソフトキーを押すか、**Entry** ノブを押してこの測定を追加します。

オシロスコープの画面上には4つの測定が表示されているはずですが、2つのデフォルト測定 (周波数とVp-p) と、遅延時間測定と位相シフト測定です。今度は、これら2つの信号間の位相シフトを変更します。

- 14 [Help]を押し、**Training Signals** (トレーニング信号) ソフトキーを押します (これにより、トレーニング信号メニューが復元されます)。
- 15 **Phase** ソフトキーを押し、**Entry** ノブを回して、位相シフトを0度から360度に変更します。

今度は、これらの波形を別のフォーマットで表示しますが、おそらくは教授がよく使うオシロスコープの表示フォーマットの1つでしょう。これらの波形をリサージュ曲線で表示します。リサージュ曲線は、フランス人数学者Jules Antoine Lissajous (1822～1880年) にちなんで名付けられています。

- 16 フロントパネルの[Horiz]キー (オシロスコープのタイムベース・コントロール付近にある) を押します。
- 17 **Time Mode** (時間モード) ソフトキーを押し、**Entry** を回してXYを選択します。

18 [Help]を押し、**Training Signals**（トレーニング信号）ソフトキーを押します。

19 **Phase**（位相）ソフトキーを押し、**Entry**ノブを回して位相シフトを変更します。

オシロスコープは、波形を電圧対時間ではなく、電圧（チャンネル1）対電圧（チャンネル2）でプロットしています。位相シフトがちょうど90度または270度の場合は、完全な円が表示されます。位相シフトがちょうど0度の場合は、45度の角度でラインが立ち上がります。位相シフトがちょうど180度の場合は、45度の角度でラインが立ち下がります。他の位相設定では、図40のように楕円形が表示されます。同じ周波数の正弦波のリサージュ曲線では、曲線の形状が最も単純になります。

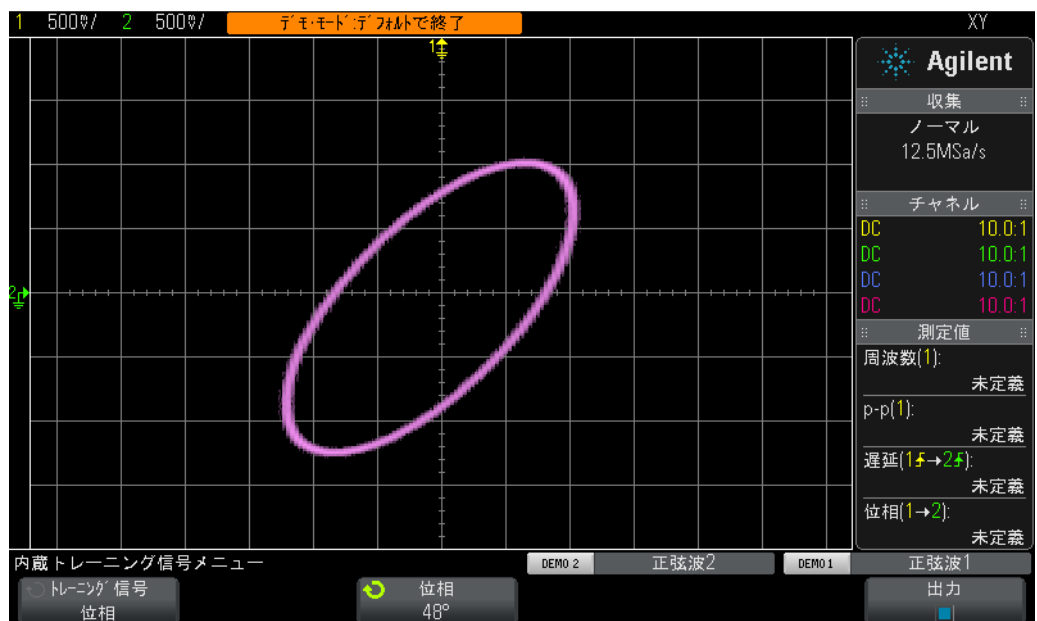


図40 周波数は同じで、互いに48度位相がずれている2つの正弦波の、オシロスコープのXYモードを使用したリサージュ・パターン

アナログ増幅器のエンジニアは、オシロスコープのリサージュ曲線を使用して回路の微調整を行うこともあります。リサージュ・パターンは非常に複雑になることもありますが、アナログ・エンジニアは通常、自分たちが探し求めているパターンを認識しています。図41に、周波数の異なる2つの信号のより複雑なリサージュ・パターンを示します。

3 高度なオシロスコープ測定ラボ

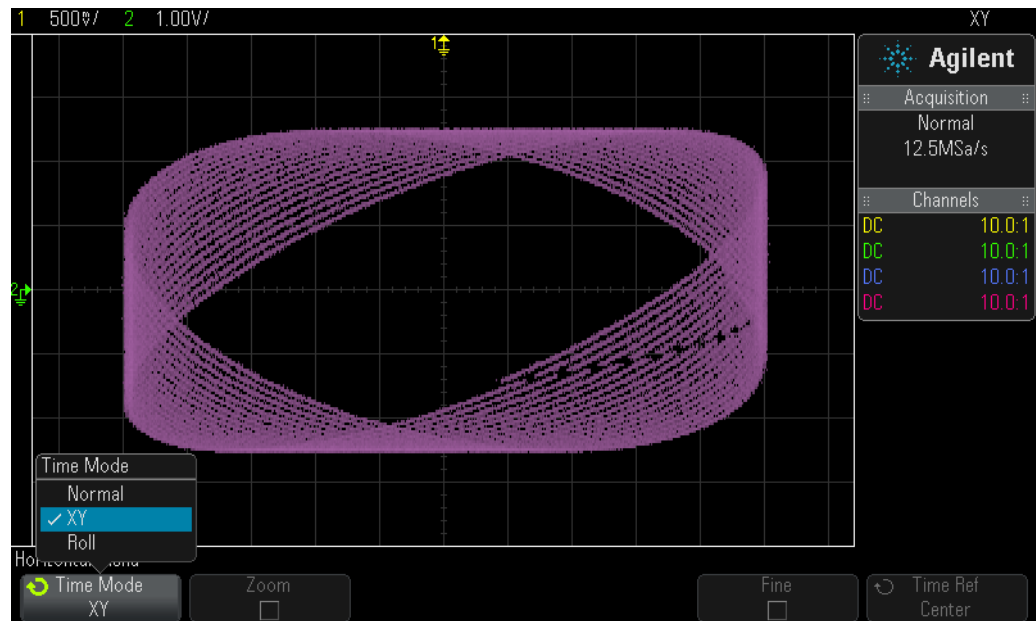


図41 周波数の異なる2つの信号による複雑なリサージュ・パターン

ラボ#13 : オシロスコープの波形演算の使用方法

オシロスコープは、波形の自動パラメトリック測定だけでなく、波形全体または波形ペアに対して演算を実行することも可能です。必要に応じてオシロスコープに実行させたい一般的な波形演算機能として、波形間の減算機能があります。例えば、標準の10:1パッシブ・プローブを使用して回路上の波形を捕捉する場合は、これらの波形のグランドだけを基準にした捕捉に限られます。では、コンポーネントの一端がグランドに接続されているコンポーネントの波形をモニタしたい場合はどうするのでしょうか？この場合は、コンポーネントの両端の波形をグランドを基準にして捕捉して、一方の波形をもう一方の波形から減算します。試してみましょう。

- 1 Demo1/Demo2端子とチャンネル1/チャンネル2入力BNCの間がそれぞれ、2本のオシロスコープ・プローブで接続されていることをもう一度確認します。
- 2 オシロスコープのフロント・パネルにある[Default Setup]を押します。
- 3 [2]フロントパネル・キーを押して、チャンネル2をオンにします。
- 4 [Help]を押し、**Training Signals** (トレーニング信号) ソフトキーを押します。
- 5 **Entry** ノブを使って“**Phase Shifted Sine** (位相シフト正弦波)”信号を選択し、**Output** (出力) ソフトキーを押してオンにします。
- 6 チャンネル1のV/div設定を**500 mV/div**に設定します。
- 7 チャンネル2のV/div設定を**500 mV/div**に設定します。
- 8 オシロスコープのタイムベースを**200.0 μs/div**に設定します。
- 9 フロントパネルの[Math]キー (フロント・パネルの右側) を押します。
- 10 **Operator** (演算子) ソフトキーを押し、**Entry**を回して“-”を選択します。

オシロスコープのディスプレイには、[図42](#)のような3つの波形が表示されているはずですが。紫色の波形は、オシロスコープの演算機能を実行して、チャンネル1の波形からチャンネル2の波形を減算した結果です。今度は、この2つの正弦波の位相シフトを変更して、その結果をモニタします。

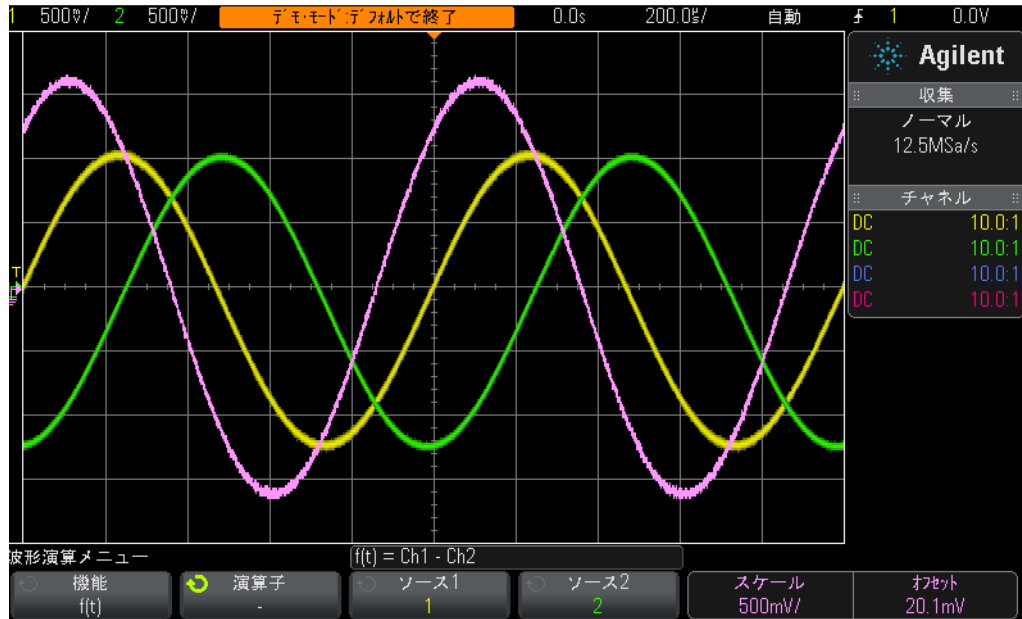


図42 波形演算を使用したチャンネル1の波形からチャンネル2の波形の減算

11 [Help] フロントパネル・キーを押してから、**Training Signals** (トレーニング信号) ソフトキーを押します。

12 **Phase** (位相) ソフトキーを押し、**Entry** ノブを回して位相シフトを変更します。

位相シフトがちょうど180度の場合は、予想どおり、最大振幅の演算波形が表示されません。位相シフトがちょうど0度または360度の場合は、フラットライン (0.0 V) の演算波形が表示されます。オシロスコープのフロント・パネルの右側 ([Math] キー付近) にあるノブを使って、演算波形のスケールを変更することができます。今度は、より複雑な演算機能FFT (高速フーリエ変換) を実行します。

13 [Default Setup] を押します。

14 [Help] を押し、**Training Signals** (トレーニング信号) ソフトキーを押します。

15 **Entry** ノブを使って“**Clock with Infrequent Glitch** (発生頻度の少ないグリッチのあるクロック)”信号を選択し、**Output** (出力) ソフトキーを押してオンにします。

16 チャンネル1のV/div設定を**500 mV/div**に設定します。

17 この波形を画面中央に表示するために、チャンネル1のオフセットを約**1.00 V**に設定します。

18 トリガ・レベル・ノブを押して、トリガ・レベルを約**50 %**に設定します。

19 タイムベースを**100.0 μs/div**に設定します。このタイムベース設定では、多数のクロック信号のサイクルが画面上に表示されます。これは通常、高精度のFFT演算機能を行う場合に不可欠です。

20 [Math]フロントパネル・キーを押してから、**Operator** (演算子) ソフトキーを押します。

21 **Entry** ノブを使って、**FFT**演算機能を選択します。

図43のような画面が表示されているはずです。オシロスコープには、タイム・ドメイン波形（電圧対時間）と周波数ドメイン波形（パワー（dB）対周波数）の両方が表示されています。**FFT**演算機能は、信号を個々の正弦波周波数成分に分解します。デジタル信号を含むすべての電気信号は異なる周波数の複数の正弦波から構成されています。50%のデューティ・サイクルを持つ理想のクロック信号は、正弦波の基本波周波数成分（信号の繰り返し周波数）と、奇数次の高調波（3次、5次、7次など）から構成されています。理想的でない方形波には、低レベルの偶数次高調波も含まれています。今度は、基本波と奇数次高調波の周波数を確認します。



図43 繰り返しデジタル・クロックに対するFFT演算機能の実行

22 フロントパネルにある[Cursors (カーソル)]キー (Cursorsノブ付近) を押します。

23 **Source** (ソース) ソフトキーを押し、**Entry** ノブを回して、**Source** をチャンネル 1 から **Math: f(t)** (演算: $f(t)$) に変更します。

24 **Cursors** (カーソル) ノブを押し、**X1**カーソルを選択します。

25 **Cursors**メニューが閉じた後、**X1**カーソルが最大周波数ピークの上 (ディスプレイの左側付近) に置かれるまで、**Entry**ノブを回します。

26 **Cursors** (カーソル) ノブを再度押し、**X2**カーソルを選択します。

3 高度なオシロスコープ測定ラボ

27 Cursors (カーソル) メニューが閉じた後、X2カーソルが2番目に大きい周波数ピークの上に置かれるまで、**Entry**ノブを回します。

28 X1周波数はいくつですか？また、基本波成分（ディスプレイの下部付近に表示されている値）はどれですか？

F1 = _____

29 X2周波数はいくつですか？また、3次高調波はどれですか？

F3 = _____

このトレーニング信号の基本波周波数は、**InfiniiVision 2000 X**シリーズ オシロスコープと**3000 X**オシロスコープとで異なります。

ラボ#14 : アンダーサンプリングに対応するためのピーク検出

すべてのDSO/MSOは固有の捕捉メモリを備えています。これは、オシロスコープが捕捉サイクルごとにデジタイズできるサンプル数です。タイムベースを20 ns/divなどの比較的高速のs/divに設定した場合も、オシロスコープには常に、設定したタイムベース設定、最大仕様サンプリング・レートで波形を捕捉できるだけのメモリがあります。例えば、オシロスコープの最大仕様サンプリング・レートが2 Gサンプル/s（サンプル間が500 ps）で、オシロスコープのタイムベースが20 ns/divに設定されている場合は、400ポイントの捕捉メモリ容量があれば、1つの完全な波形を捕捉して表示することができます。20 ns/divでは、200 ns（20 ns/div × 10 div（水平））で、オシロスコープの画面全体に表示される1つの完全な波形になります。2 Gサンプル/sのサンプリング・レートを維持しながらこの時間に対応するためには、400ポイント（200 ns/500ポイント=400）のメモリ容量が必要です。

より低速の波形をより長期間捕捉するために、オシロスコープのタイムベースをはるかに低速のs/divに設定した場合は、必要な波形時間に対応するために、オシロスコープは必要に応じてサンプリング・レートを自動的に下げます。すべてのDSO/MSOがこれを実行します。例えば、比較的低速の信号を捕捉したいので、オシロスコープのタイムベースを10 ms/div（画面全体で100 ms）に設定する必要があると仮定します。オシロスコープの最大メモリ容量が100 kポイントの場合は、オシロスコープはサンプリング・レートを1Mサンプル/s（100 ms/100 k=1 μsのサンプリング周期）に下げる必要があります。

多くの場合、より低速の波形を捕捉するのに高速なサンプリング・レートは不要なので、これは問題ではありませんが、低速特性と高速特性を持つ入力信号の場合はどうなるのでしょうか？例えば、捕捉したい入力信号が30 Hzの正弦波で、非常に急峻なグリッチが乗っている場合はどうなるのでしょうか？30 Hzの正弦波の捕捉には高速のサンプリングレートは不要ですが、急峻なグリッチの捕捉には超高速のサンプリング・レートが必要な場合があります。こうした信号を捕捉するための設定について学びます。

- 1 チャンネル1入力BNCと“Demo1”端子を1本のオシロスコープ・プローブで接続します。このプローブのグラウンド・クリップを中央端子（グラウンド）に接続します。
- 2 オシロスコープのフロント・パネルにある[Default Setup]を押します。
- 3 [Help]を押し、Training Signals（トレーニング信号）ソフトキーを押します。
- 4 Entryノブを使って“Sine with Glitch（グリッチのある正弦波）”信号を選択し、Output（出力）ソフトキーを押してオンにします。
- 5 チャンネル1のV/div設定を500.0 mV/divに設定します。
- 6 オシロスコープのタイムベースを10.00 ms/divに設定します。
- 7 [Intensity]ボタン（Entryノブの下）を押し、Entryノブを使って、波形トレースの輝度を100%に設定します。

3 高度なオシロスコープ測定ラボ

この時点では、[図44](#)のような正弦波が表示されているはずですが、よく見ると、この正弦波のピーク付近にいくつかのグリッチ（高速パルス）が発生していることもわかります。また、これらのグリッチの振幅が変動している（上下に揺れている）ように見える場合があります。これらのグリッチの振幅は、実際には非常に安定しています。問題は、オシロスコープがサンプリング・レートを下げて（オシロスコープのディスプレイのAgilentロゴの下に表示されているサンプリング・レートに注目してください）、急峻なグリッチを間欠的に捕捉していることです。すなわち急峻なグリッチの捕捉でアンダーサンプリングが発生しています。グリッチのピークを捕捉する場合があります。グリッチの途中のポイントを捕捉する場合があります。また、グリッチをまったく捕捉していない（グリッチ幅がサンプリング間隔より狭い）場合もあります。このオシロスコープには、この問題を解決することができる、「ピーク検出」と呼ばれる特殊な収集モードがあります。このモードをオンにしてみましょう。

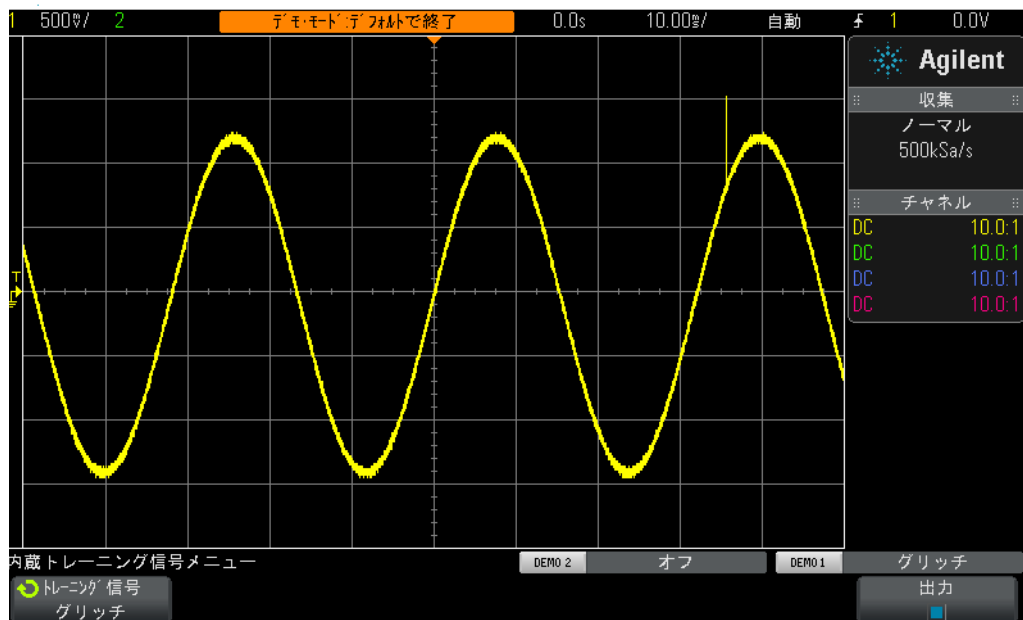


図44 オシロスコープがサンプリング・レートを自動的に下げるにより、繰り返しグリッチのアンダーサンプリング

8 フロントパネルの[Acquire]キー（Cursors（カーソル）ノブの下）を押します。

9 **Acq Mode**（収集モード）ソフトキーを押し、**Entry**を回して**Peak Detect**（ピーク検出）を選択します。

グリッチの高さは現在、[図45](#)のようにはるかに安定しているように見えているはずですが、下げたレートで波形をサンプリングするのではなく、**Peak Detect**収集モードを選択した場合は、オシロスコープは、より高速のサンプリング・レートで収集したデータをインテリジェントにデシメートします。例えば、オシロスコープが最大サンプリング・レートの1/100のサンプリング・レートで実行する必要があると仮定します。これは、最大サンプリング・レートでオシロスコープを動かして、1/100のポイントだけをすべて記録するのと同じですが、これは「インテリジェントではない」デシメーションです。ピーク検出モードでは、オシロスコープは、高速レートでサンプリングされた連続する200サンプルのグループをリアルタイムで解析し、この200ポイントのグループの最大デジタル値と最小デジタル値（2ポイントだけ）を記録します。これはデシメーション係数が100の場合と同じです。

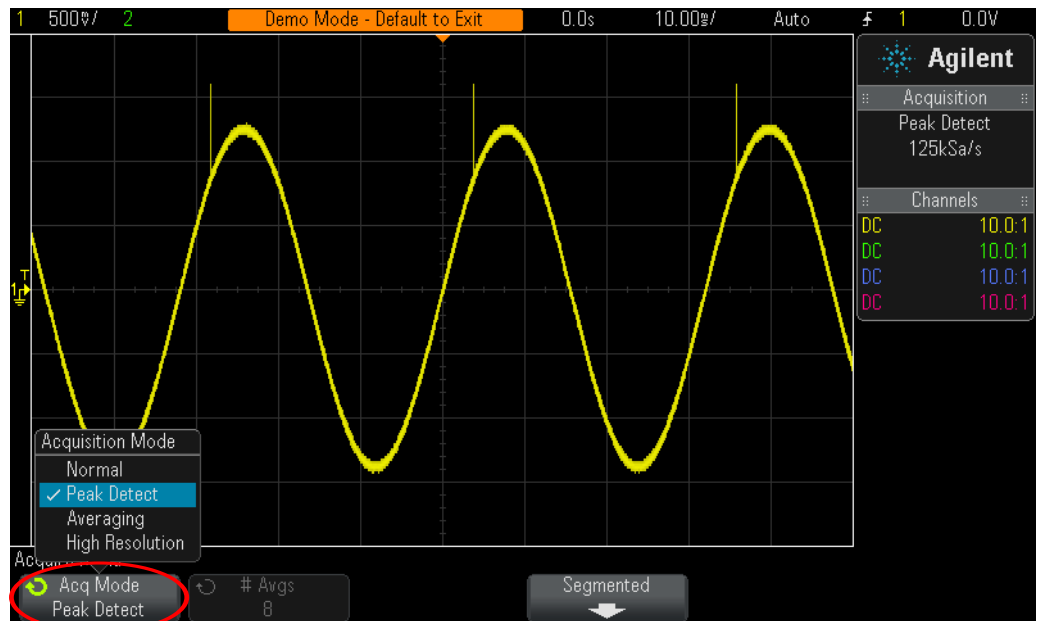


図45 ピーク検出収集モードでの低速正弦波に乗っている急峻なグリッチの捕捉

それでは常に**Peak Detect**モードを使用するとは限らないのはなぜか、という疑問が生じるはずですが。この収集モードを使用する場合には、いくつかのトレードオフがあります。何よりもまず、オシロスコープの絶対最大サンプリング・レートが低下します。第2に、記録ポイントが等間隔になりません。これは、ナイキストのサンプリング定理の1つの重要な仮定です。従って、この特定の測定アプリケーションでは、**Peak Detect**モードを使用するのが最適です。しかし、他の測定アプリケーションでは、**Peak Detect**が適した収集モードであるとは限りません。

オシロスコープのリアルタイム・サンプリングの詳細については、Agilentのカタログ『オシロスコープのサンプリング・レートとサンプリング忠実度の評価』（カタログ番号：5989-5732JAJP）を参照してください。このアプリケーション・ノートは、本書の終わりに、ダウンロード方法とともに掲載されています。

ラボ#15 : セグメント・メモリを使用したより多くの波形の捕捉

セグメント・メモリは、AgilentのInfiniiVision 2000/3000 Xシリーズ オシロスコープのオプション機能です。このラボには、オシロスコープにこのセグメント・メモリ機能がインストールされている必要があります。この前のラボで学んだように、すべてのオシロスコープが限られた容量の捕捉メモリを備えています。オシロスコープの捕捉メモリの容量によって、高速サンプリング・レートを使用した場合の捕捉可能な時間の長さが決まります。タイムベース設定 (s/div) を長く設定するだけで、常に長いタイム・スパンの捕捉が可能です。しかし、長いタイム・スパンを捕捉するために、オシロスコープがサンプリング・レートを自動的に下げる場合があり、波形の測定分解能が低下することがあります。特に複数の低デューティ・サイクル・タイプの信号を捕捉する場合は、このオシロスコープのセグメント・メモリ・モードを使用することが、メモリ容量とサンプリング・レートを最適化するためのもう1つの解決策になります。それでは、低デューティ・サイクルのレーダ・バーストを捕捉してみましょう。

- 1 チャンネル1入力BNCと“Demo1”端子を1本のオシロスコープ・プローブで接続します。このプローブのグラウンド・クリップを中央端子 (グラウンド) に接続します。
- 2 オシロスコープのフロント・パネルにある[Default Setup]を押します。
- 3 [Help]を押し、**Training Signals** (トレーニング信号) ソフトキーを押します。
- 4 **Entry** ノブを使って“**RF Burst (RFバースト)**”信号を選択し、**Output** (出力) ソフトキーを押してオンにします。
- 5 チャンネル1のV/div設定を**500.0 mV/div**に設定します。
- 6 オシロスコープのタイムベースを**200.00 ns/div**に設定します。
- 7 オシロスコープのトリガ・レベルを約**+700 mV** (画面中央より最高1.5 div上) に設定します。
- 8 [Intensity]ボタン (**Entry** ノブの下) を押し、**Entry** ノブを使って、波形トレースの輝度を**100%**に設定します。

図46のような単一の正弦波バーストが表示されているはずです。次に、これらのバーストを複数捕捉するために、タイムベースのスケールリングを変更します。

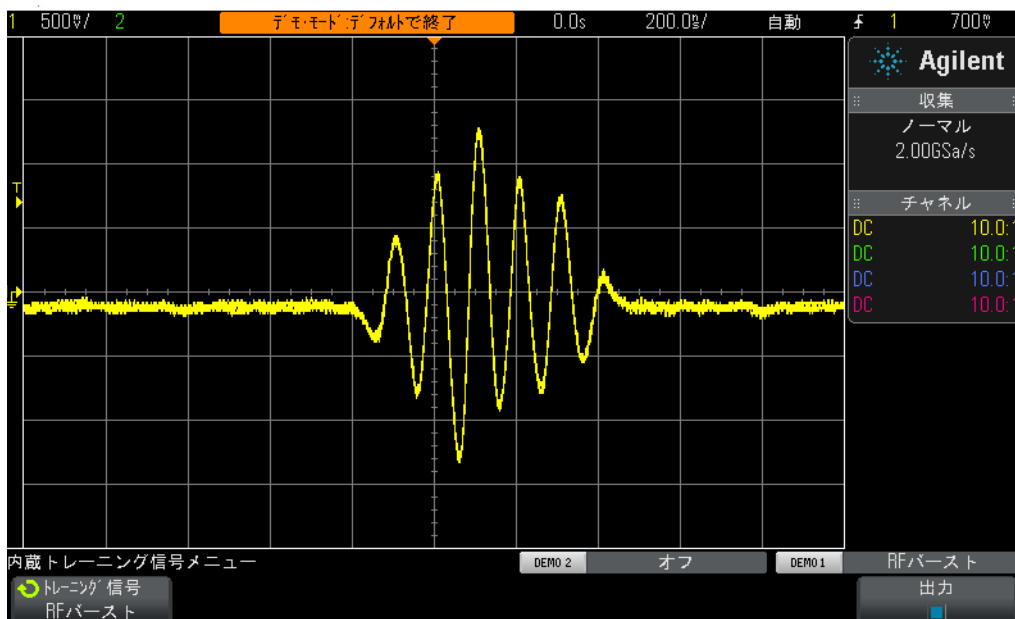


図46 200.0 ns/divでのRFバーストの捕捉と表示

- 9 Agilent 2000 Xシリーズ オシロスコープ (モデル番号はオシロスコープのディスプレイの上に表示) を使用している場合は、オシロスコープのタイムベースを**1.000 ms/div**に設定します。
- 10 Agilent 3000 Xシリーズ オシロスコープを使用している場合は、オシロスコープのタイムベースを**10.000 ms/div**に設定します。

4.0 ms間隔で発生する複数のRFバーストを捕捉しようとするれば、オシロスコープはアンダーサンプリングになり、振幅が変動した波形表示になります (図47を参照)。これもまた、限られた容量の捕捉メモリを使ってより長いタイム・スパンを捕捉するために、オシロスコープがサンプリング・レートを自動的に下げるためです (3000 Xシリーズ オシロスコープの方が2000 Xシリーズ オシロスコープより多くのメモリ容量を備えています)。次に、このアンダーサンプリングされたデータをズームインして、拡大表示します。

3 高度なオシロスコープ測定ラボ

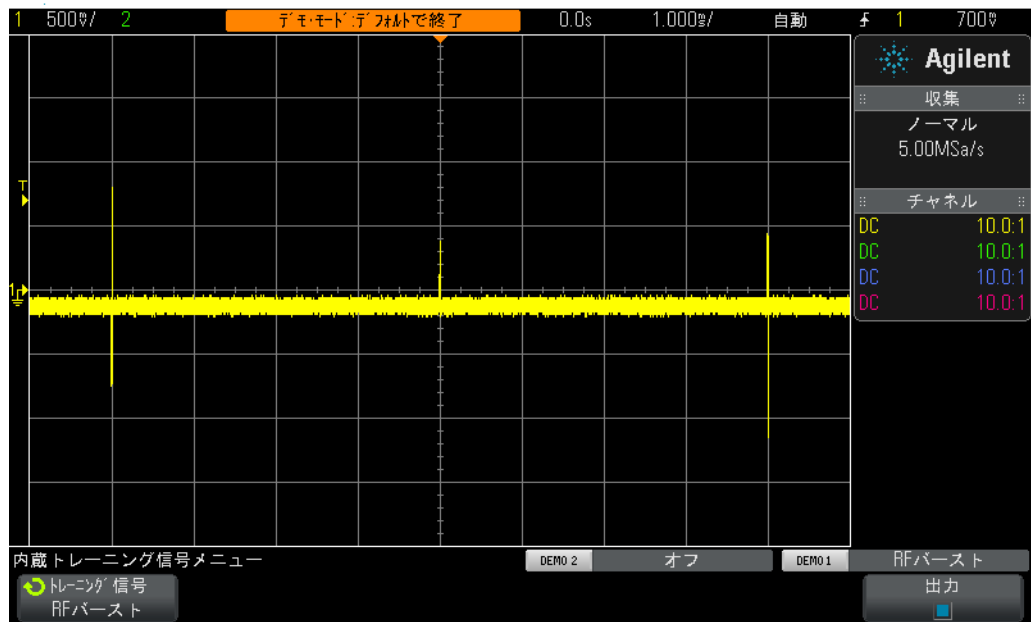


図47 より低速のタイムベース設定を使用した複数のRFバースト波形の捕捉

11 [Run/Stop]を押して繰り返し収集を停止します ([Run/Stop]キーが赤に変わります)。

12 今度は、オシロスコープのタイムベースを**200.0 ns/div**に設定します。

より低速のタイムベースで捕捉された波形をズームインすれば、図48のような三角形の波形からも分かるように、波形がアンダーサンプリングされたことは明白です。元の波形は正弦波のバーストであるということを思い出してください。

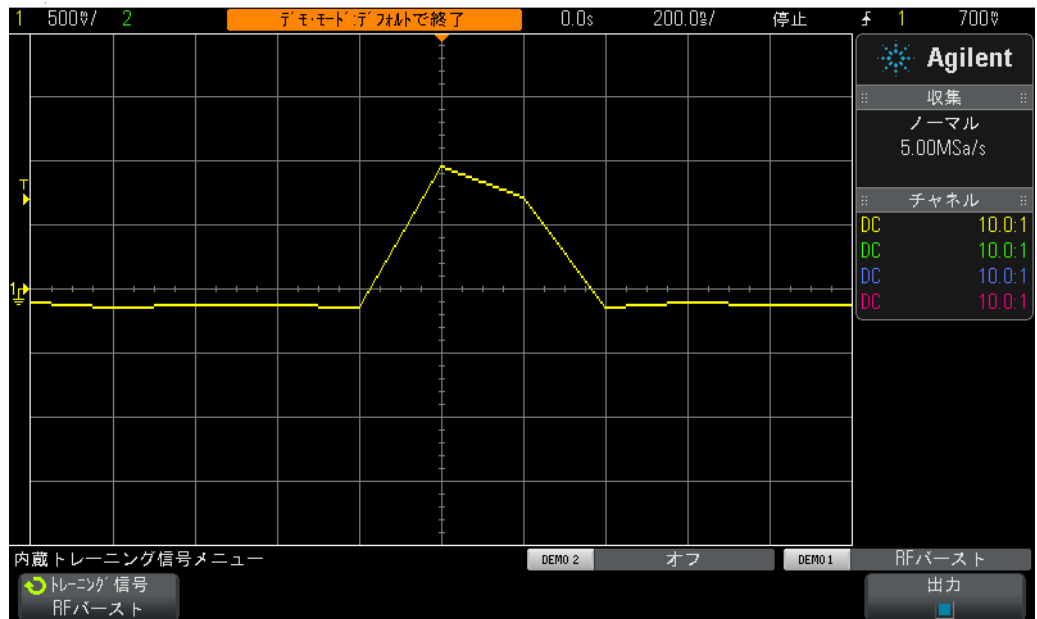


図48 ズームインによってアンダーサンプリングされたことが明らかな波形

オシロスコープのピーク検出モードを使用すれば、より低速のタイムベース設定で捕捉したときに (図47)、各バーストのピーク振幅をより正確に測定できますが、保存されているトレースをズームインすると、波形がいまだにアンダーサンプリングされていることが分かります。もう1つの解決策は、さらに大容量のメモリを備えたオシロスコープを購入することです。しかし、このソリューションには多額の費用がかかります。次に、オシロスコープのセグメント・メモリ・モードを使用して、複数のバーストを高分解能で捕捉します。

13 [Run/Stop]を押して、タイムベースを200.0 ns/divに設定したまま、繰り返し収集を再開します ([Run/Stop]キーが緑に変わります)。

14 フロントパネルの[Acquire]キー (Cursorsのノブ付近) を押してから、**Segmented** (セグメント) ソフトキーを押します (SGMオプションによってライセンスされている場合にだけ使用できます)。

15 # of Segs (セグメント数) = 25までEntryノブを回します。

16 次に、**Segmented** (セグメント) ソフトキーを押してこの収集モードをオンにします。

オシロスコープは25回連続して発生したこのバーストを捕捉しました。詳しく見てみましょう。

17 **Current Seg** (現セグメント) ソフトキーを押し、**Entry**を回して、25個の波形をすべて調べます。

18 次に、**Entry**ノブを使って、**Current Seg** (現セグメント) = 25を設定します (最後に捕捉されたセグメント/波形)。

3 高度なオシロスコープ測定ラボ

オシロスコープは、連続する低デューティ・サイクルの信号バーストを捕捉するだけでなく、各セグメント／波形に「タイム・タグを付ける」ので、最初の捕捉セグメント／波形を基準にした各セグメント／波形の時間がわかります。タイム・タグはディスプレイの左下コーナに表示されています。セグメント#25には、時刻スタンプと共に、約96 msのタイム・タグが付けられています（図49を参照）。最大サンプリング・レートで各波形が捕捉されたため、捕捉波形の分解能も非常に高いはずですが、オシロスコープのノーマル収集モードを使って最大100 ms（10 ms/div）のタイム・スパンを捕捉する場合、オシロスコープはサンプリング・レートを大幅に下げるので、各バーストのサンプル分解能が極端に低下します。

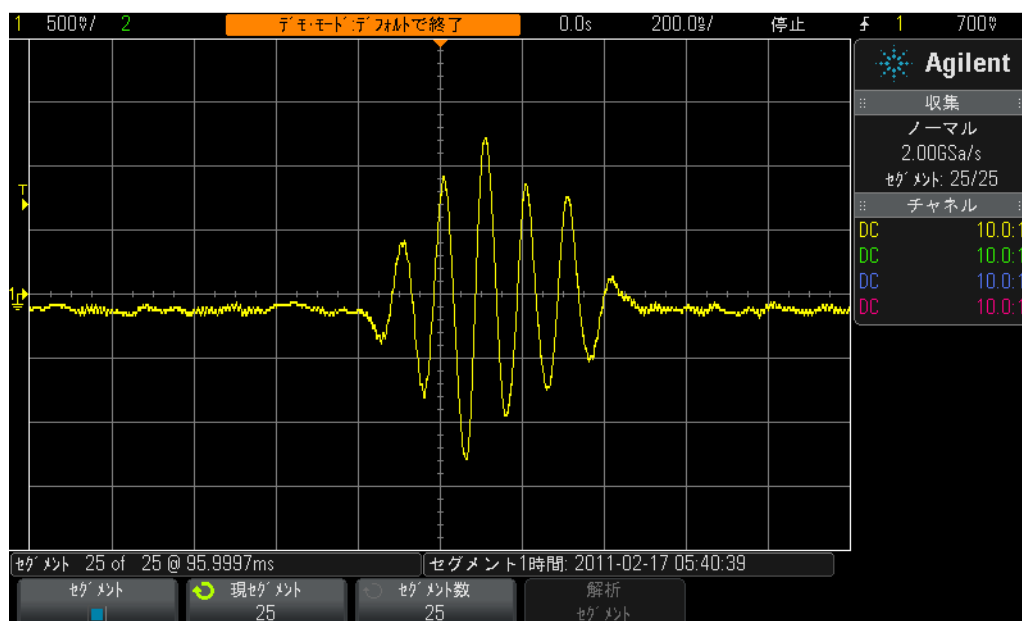
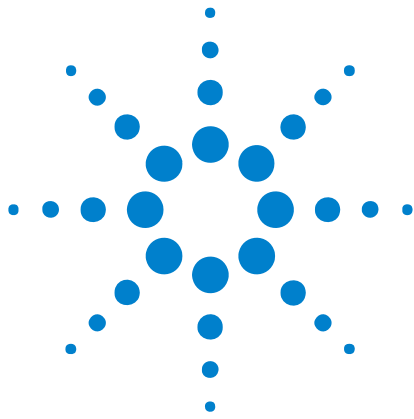


図49 セグメント・メモリにより、多くの波形を高分解能で捕捉可能

セグメント・メモリは、信号（この場合は短い正弦波バースト）の小さな部分（セグメント）の波形データだけを捕捉することにより、オシロスコープの捕捉メモリを最適化します。各バースト間の重要でない信号デッドタイムは捕捉されません。セグメント・メモリは、デジタル・データの複数のシリアル・パケットの捕捉にも非常に有効なツールです。



4 まとめ

Agilentの関連カタログ 84

このオシロスコープ・ラボ・ガイド／チュートリアルのラボをすべて完了することができれば、オシロスコープおよびオシロスコープの使用方法をよく理解できているはずです。これにより、回路に関する実験課題をより効率的に完了でき、電子工学／物理学の理論に対する理解が深まるだけでなく、卒業して業界でデザインの検証やテストにオシロスコープを使い始めた時に、デザインのデバッグを迅速に行い、製品をいち早く市場に出すことができるようになります。オシロスコープやオシロスコープ測定の詳細については、次ページに掲載されているAgilentのさまざまなアプリケーション・ノートを参照してください。

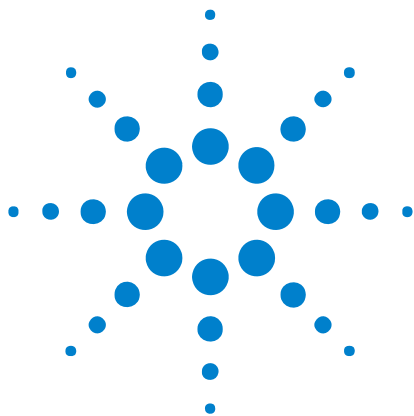


Agilentの関連カタログ

表1 Agilentの関連カタログ

タイトル	カタログ・タイプ	カタログ番号
オシロスコープの基礎	Application Note	5989-8064JAJP
アプリケーションに最適な帯域幅を持つオシロスコープの選択	Application Note	5989-5733JAJP
オシロスコープのサンプリング・レートとサンプリング忠実度の評価	Application Note	5989-5732JAJP
オシロスコープの表示性能の評価	Application Note	5989-7885JAJP
オシロスコープ：垂直軸の雑音特性評価	Application Note	5989-3020JAJP
異常信号の検出に影響を与えるオシロスコープの表示品質	Application Note	5989-2003JAJP
ミックスドシグナル・オシロスコープを使用したミックスド信号回路のデバッグ	Application Note	5989-3702JAJP
Evaluating Oscilloscope Segmented Memory for Serial Bus Applications	Application Note	5990-5817EN

これらのカタログをダウンロードするには、以下のURLの「xxxx-xxxx」にカタログ番号を挿入してください。 <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/xxxx-xxxx.pdf>



A オシロスコープのブロック図と 動作原理

DSOのブロック図 86

ADCブロック 86

アッテネータ・ブロック 87

DCオフセット・ブロック 87

増幅器ブロック 87

トリガ・コンパレータ・ブロックとトリガ・ロジック・ブロック 88

タイムベース・ブロックと捕捉メモリ・ブロック 89

Display DSPブロック 90



DSOのブロック図

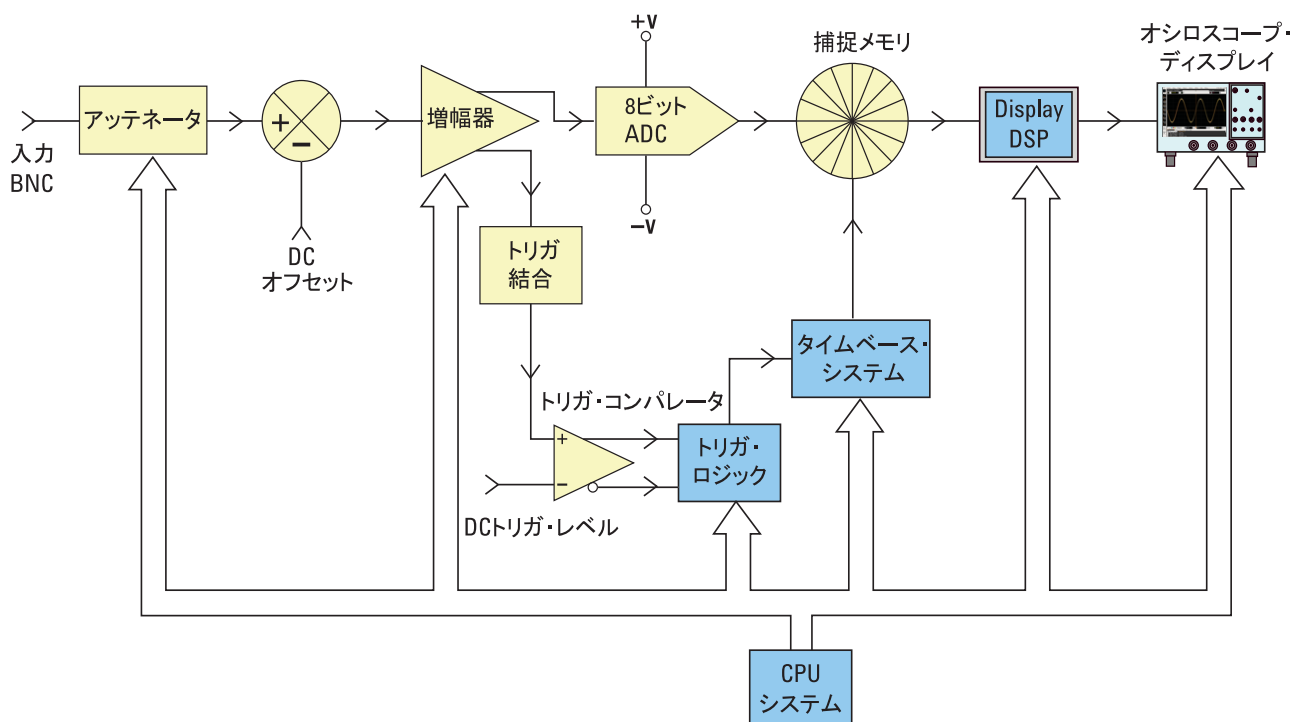


図50 DSOのブロック図

図50は、代表的なデジタル・ストレージ・オシロスコープ (DSO) の1つの収集チャンネルのブロック図を示したものです。黄色で示されたブロックは、チャンネル1またはチャンネル2などの単一の収集チャンネルに固有のシステム・コンポーネントを表しています。青で示されたブロックは、オシロスコープの共通タイムベースやCPUシステムなどのすべての収集チャンネルに共通のシステム・コンポーネントを表しています。

ADCブロック

このブロック図の中央付近には、A/Dコンバータ (ADC) が示されています。ADCブロックは、すべてのDSOのコア・コンポーネントです。このブロックの機能は、アナログ入力を一連のデジタル・ワードに変換することです。今日のDSOのほとんどは、256の固有のデジタル出力レベル/コードに変換する8ビットADCを使用しています。これらのデジタル・バイナリ・コードは、オシロスコープの捕捉メモリに保存されます。これについては、後で説明します。ADCに対するアナログ入力レベルが $-V$ 以下の場合、ADCの出力は00000000 (10進法の0) になります。ADCに対するアナログ入力レベルが $+V$ 以上の場合、ADCの出力は11111111 (10進法の255) になります。ADCに対するアナログ入力レベルが0.0 Vの場合は、ADCの出力は10000000 (10進法の128) になります。

最高の分解能と確度の高い測定を実現するには、ADCに対する入力をダイナミック・レンジ ($\pm V$) 内にスケールする必要があります。ADCの入力ダイナミック・レンジはADCの基準電圧 ($\pm V$) に基づいて設定されていますが、オシロスコープは、ハイ・レベルとロー・レベルの両方の入力信号など、広いダイナミック・レンジの信号を捕捉す

ることができなければなりません。ADCのアナログ入力のADCのダイナミック・レンジ内へのスケーリングは、アッテネータ・ブロック、DCオフセット・ブロック、増幅器ブロックの組み合わせにより決定されます。これらのブロックについては、次のセクションで説明します。

アッテネータ・ブロック

アッテネータ・ブロックは、基本的には、入力信号をオシロスコープの可変利得アナログ増幅器/ADCのダイナミック・レンジ内にスケーリングするのに使用される抵抗ダイバイダ・ネットワークです。ハイ・レベルの信号（40 Vppなど）を入力する場合は、信号レベルを下げる（減衰する）必要があります。ロー・レベル信号（10 mVppなど）を入力した場合は、入力信号が減衰せずに増幅器にパス・スルーされます。オシロスコープのV/div設定を変更した場合は、クリック音が聞こえることがあります。メカニカル・リレーが抵抗ダイバイダ・ネットワークを切り替えると、クリック音が聞こえます。アッテネータ・ブロックには、AC/DC入力カップリングだけでなく、ユーザ選択可能な入力インピーダンス（1 M Ω /50 Ω ）の切り替えも含まれています。

DCオフセット・ブロック

0 V～5 Vの範囲でスイングするデジタル信号など、DCオフセットを持つ信号を入力する際に、この信号をオシロスコープのディスプレイの中央に表示したい場合は、入力信号をADCのダイナミック・レンジ内にシフトするために、逆極性の内部DCオフセットを信号に付加する必要があります。別の方法として、AC結合を選択して、入力信号のDC成分を除去することも可能です。

増幅器ブロック

入力信号をADCシステムのダイナミック・レンジ内にスケーリングするための最後のアナログ処理ステージは、オシロスコープの可変利得増幅器です。非常にロー・レベルの信号を入力する場合は、通常、V/div設定を比較的小さな値に設定します。V/divを低く設定すれば、アッテネータ・ステージから増幅器に直接、この信号が減衰せずに（利得=1で）パス・スルーされます。増幅器は次に、ADCのダイナミック・レンジをフルに活用するために、信号の振幅を増幅します（利得>1）。非常にハイ・レベルの信号を入力する場合は、通常、V/div設定を比較的大きな値に設定します。V/divを大きな値に設定すれば、アッテネータ・ステージでまず、増幅器のダイナミック・レンジ内に収めるために入力信号が減衰されます（利得<1）。その後、増幅器によって、ADCのダイナミック・レンジ内に収めるためにさらに信号が減衰される場合があります（利得<1）。

特定のV/div設定を選択すれば、オシロスコープは、アッテネータ・ブロックにおける必要な減衰量と、増幅器ブロックにおける必要な利得量（減衰が追加される可能性がある）を自動的に決定します。アッテネータ・ブロック、DCオフセット・ブロック、増幅器ブロックは、代表的な入力信号を、オシロスコープの特定のチャンネルのV/divおよびオフセット設定に基づいて、ADCブロックのダイナミック・レンジ内に収まるようにリニアに調整するアナログ入力シグナル・コンディショニングの信号ブロックと考えることができます。

トリガ・コンパレータ・ブロックとトリガ・ロジック・ブロック

トリガ・コンパレータ／トリガ・ロジック・ブロックの目的は、同期収集を確立する入力信号（または複数の入力信号の組み合わせ）上に一意のタイム・ポイントを設定することです。本書のラボ#2（オシロスコープのトリガの基本の習得）の完了後には、トリガとは一体何なのか、より良く理解できるようになっているはずです。

入力信号が正弦波で、正弦波の立ち上がりエッジで50%のレベルでデータ収集をトリガしたいと仮定します。この場合、トリガ・コンパレータの非反転出力は、デューティ・サイクルが50%の方形波になります。トリガ・レベルを50%より上のレベルに設定した場合は、トリガ・コンパレータの非反転出力は50%未満になります。一方、トリガ・レベルを50%より下のレベルに設定した場合には、トリガ・コンパレータの非反転出力は50%より大きくなります。単一チャンネルの立ち上がりエッジだけに基づいたトリガと仮定した場合、トリガ・ロジック・ブロックは、トリガ・コンパレータの非反転出力をタイムベース・ブロックに渡します。単一チャンネルの立ち下がりエッジでトリガをかけるように選択した場合は、トリガ・ロジック・ブロックは、トリガ・コンパレータの反転出力をタイムベース・ブロックに渡します。タイムベース・ブロックは、トリガ信号の立ち上がりエッジを一意の同期タイム・ポイントとして使用します。また、複数の入力チャンネルからの入力信号の組み合わせはもちろん、時間修飾など他の多くの変数に基づいてトリガをかけることも可能です。

タイムベース・ブロックと捕捉メモリ・ブロック

タイムベース・ブロックは、ADCサンプリングの開始/終了時間をトリガ・イベントを基準にして制御します。さらに、タイムベース・ブロックは、ADCのサンプリング・レートを、オシロスコープの利用可能な捕捉メモリ容量とタイムベース設定に基づいて制御します。例えば、1 ms/divのタイムベース設定を使用して画面中央でトリガするように（デフォルト設定）オシロスコープを設定したと仮定します。また、わかりやすくするために、オシロスコープの捕捉メモリ容量がちょうど1000ポイントであると仮定します。これらの仮定に基づくと、オシロスコープは、トリガ・イベント前に500ポイントを捕捉し、トリガ・イベント後に500ポイントを捕捉します。このタイムベース設定では、オシロスコープは、10 msのタイム・スパン（1 ms/div × 10 div）にわたって、1000ポイントを捕捉します。オシロスコープの最大仕様サンプリング・レートが2 Gサンプル/sでも、このタイムベース設定では、タイムベース・ブロックは、オシロスコープの連続サンプリング・レートを100 kサンプル/s（サンプリング・レート＝メモリ/タイム・スパン＝1000サンプル/10 ms＝100 kサンプル/s）に下げます。

Runキーを押せば、タイムベース・ブロックによって、デジタル化したデータをオシロスコープの巡回捕捉メモリに、適切なサンプリング・レート（100 kサンプル/s）で連続的に保存できるようになります。タイムベース・ブロックは、各サンプリング後に巡回捕捉メモリ・バッファのアドレス指定値を増やすと同時に、抽出したサンプルの数を500個までカウントします（メモリ容量1000、画面中央でのトリガと仮定）。タイムベース・ブロックは、500個以上のサンプルが保存された（捕捉メモリの1/2以上が一杯である）と判断すれば、トリガをオンにして、出力トリガ・コンパレータの最初の立ち上がりエッジを探し始めます（シングル・エッジ・トリガ・モードと仮定）。トリガ・イベントを探しながら、データがオシロスコープの巡回捕捉メモリ・バッファに記録され続けます。トリガ・イベントの発生頻度が非常に少ない場合は、トリガ・イベントを待ち続けている間に、保存されているサンプルが実際には上書きされる可能性があります。これは問題ではありません。トリガ・イベントが検出されれば、タイムベース・ブロックは再び500までカウントし始めます。さらに500個のサンプルが保存された場合は、タイムベース・ブロックはサンプリングをオフに（シャット・ダウン）します。つまり、最後の500個の保存されているサンプルがトリガ・イベント後に発生した波形上のシーケンシャル・ポイントを表すのに対して、前の500個のポイントはトリガ・イベント前に発生した波形上のシーケンシャル・ポイントを表します。このポイントで、処理がDisplay DSPブロックに引き渡されます。

画面中央でのトリガ例を用いましたが、水平遅延/位置コントロールを使って、トリガ・ポイントを任意のポイントに配置することができます。例えば、トリガ・イベントが水平軸に沿って75 %ポイントで発生するように（画面の左側を基準にして）遅延を調整した場合は、タイムベース・ブロックは、初めに750個のポイントを保存してからトリガをオンにし（メモリ容量を1000ポイントと仮定）、トリガ・イベントを検出してからさらに250個のポイントを捕捉するように、カウンタを設定します。

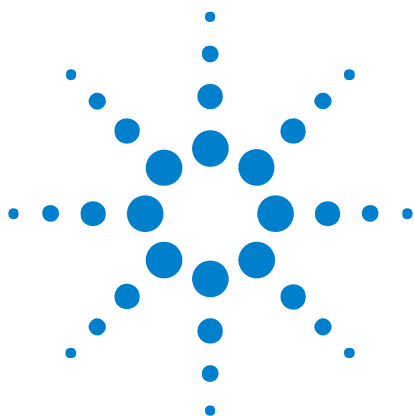
Display DSPブロック

収集が終了すれば、Display DSPブロックは、捕捉メモリ・ブロックから保存されているデータをLIFOシーケンスで削除します。Display DSPブロックは、 $\text{Sin}(x)/x$ デジタル補間フィルタの実行などの保存データのデジタル信号処理をすばやく実行できるだけでなく、保存データや処理済みデータをオシロスコープのピクセル・ディスプレイ・メモリに「パイプラインを使用して送信」することもできます。捕捉メモリからデータが「バックアウト（削除）」されれば、DSPブロックは、別の収集を開始できることを知らせる信号をタイムベース・ブロックに送ります。

以前の世代のDSOには、明示的なDisplay DSPブロックは内蔵されていませんでした。この機能は従来、オシロスコープのCPUシステムによって処理されていましたが、非常に低効率で、波形更新レートが非常に低速でした。カスタム・ディスプレイDSP処理により、今日のDSOの中には、1,000,000波形/sの速さで波形を更新できるものもあります。

ヒント

オシロスコープの基本の詳細については、Agilentのアプリケーション・ノート『オシロスコープの基礎』（カタログ番号：5989-8064JAJP）をダウンロードしてください。このカタログは、本書の「[Agilentの関連カタログ](#)」に、ダウンロード方法とともに掲載されています。



B オシロスコープの帯域幅に関する チュートリアル

オシロスコープの帯域幅の定義	91
アナログ・アプリケーションに必要な帯域幅	92
デジタル・アプリケーションに必要な帯域幅	93
デジタル・クロック測定の比較	96

オシロスコープには、信号の捕捉／測定確度を決定するさまざまな仕様がありますが、オシロスコープの主要な仕様は帯域幅です。電子工学の学部生がラボで使用しているオシロスコープは、教授から出された実験課題の全部ではないにしても、ほとんどに対応できるだけの帯域幅を備えています。最終的に電子工学課程を卒業してエレクトロニクス業界に入れば、デザインをテストするのに会社の測定器の中からオシロスコープを選択しなければならなかったり、さまざまなオシロスコープを評価して購入する仕事を課せられる可能性が高くなります。このオシロスコープの帯域幅に関するチュートリアルでは、デジタル／アナログ・アプリケーションに最適な帯域幅を備えたオシロスコープの選択方法に関する有用なヒントを提供します。最初に、オシロスコープの帯域幅を定義します。

オシロスコープの帯域幅の定義

すべてのオシロスコープが、高い周波数でロールオフするローパス周波数応答を示します（図51を参照）。仕様帯域幅が1 GHz以下のオシロスコープの多くは通常、ガウシアン周波数応答と呼ばれる応答を持っています。オシロスコープのガウシアン周波数応答は、単極ローパス・フィルタで近似的に表すことができます。これについては、一部の回路のクラスの中ですでに学んだかもしれません。おそらくは、ボード線図プロットで表されていたかもしれません。

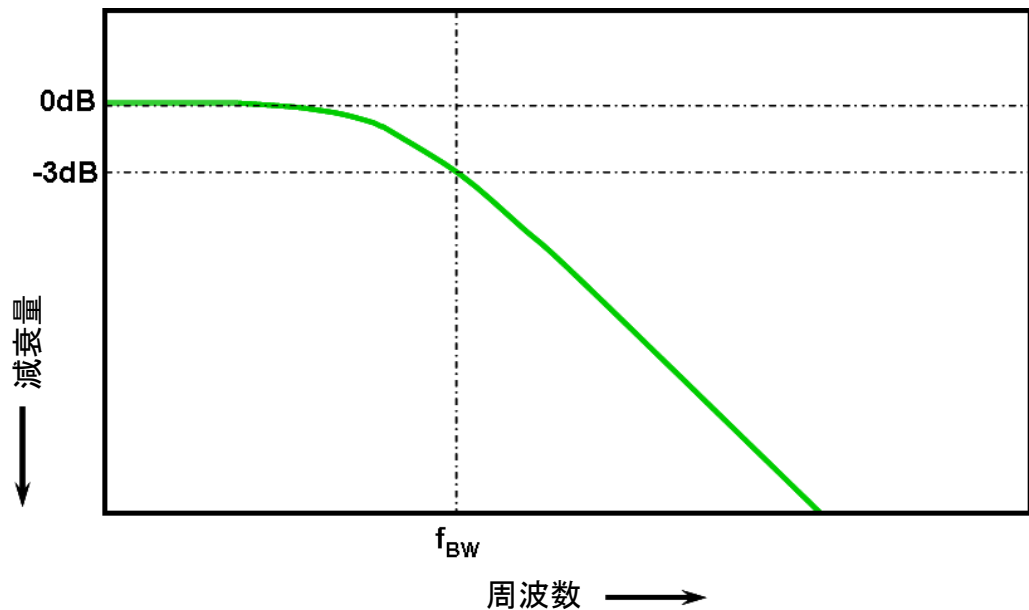


図51 オシロスコープのガウシアン周波数応答

入力信号が3 dBだけ減衰される最低周波数が、オシロスコープの帯域幅 (f_{BW}) です。
 -3 dB周波数での信号減衰は、約-30%の振幅誤差になります。すなわち、1 Vp-p、
 100 MHzの正弦波を100 MHz帯域幅のオシロスコープに入力すれば、このオシロスコープ
 で測定されるp-p電圧は、約700 mVp-p ($-3 \text{ dB} = 20 \text{ Log} [0.707/1.0]$) の範囲内にな
 ります。このため、オシロスコープの帯域幅付近に有効周波数を持つ信号は正確に測定
 できません。

オシロスコープの帯域幅仕様と密接な関係があるのが、オシロスコープの立ち上がり時
 間仕様です。ガウシアン周波数応答を持つオシロスコープの場合は、立ち上がり時間の
 概算値は、10%~90%基準で $0.35/f_{BW}$ です。しかし、オシロスコープの立ち上がり時間
 は、オシロスコープが正確に測定できる最高速のエッジ速度ではないということを覚え
 ておく必要があります。これは、入力信号が理論上無限に高速な立ち上がり時間(0 ps)
 を持つ場合に、オシロスコープが実現可能な最高速のエッジ速度です。パルス・ジェネレ
 ータは無限に高速なエッジを持っていないので、現実には、この理論上の仕様はテストで
 きませんが、オシロスコープの立ち上がり時間仕様より5~10倍高速のエッジ速度を持
 つパルスを入力することにより、オシロスコープの立ち上がり時間をテストできます。

アナログ・アプリケーションに必要な帯域幅

ほとんどのオシロスコープ・ベンダが何年も前に、オシロスコープの帯域幅は最大入力
 信号周波数よりも3倍以上高くなければならないと提言しています。この経験則は、教
 授の記憶に残っていることかもしれません。この「3倍」という倍率は、クロック・レー
 トやエッジ速度に基づいたデジタル・アプリケーションには当てはまりませんが、変調
 RFなどのアナログ・アプリケーションには今でも当てはまります。この3対1の倍率がど
 こから導出されているのかを理解するために、1 GHz帯域幅のオシロスコープの実際の
 周波数応答を調べます。

図52は、Agilentの1 GHz帯域幅オシロスコープでの実測周波数応答（1 MHz～2 GHz）を示したものです。ご覧のように、ちょうど1 GHzで測定された出力（オシロスコープのディスプレイ上の波形）が、3 dB（ $V_o/V_i > 0.7$ ）を少し切る程度に減衰しています。アナログ信号を正確に測定するには、周波数バンドの減衰の少ない比較的平坦な部分でオシロスコープを使用する必要があります。オシロスコープの1 GHz帯域幅の約1/3の周波数では、このオシロスコープではほとんど減衰がありません（ -0.2 dB）。

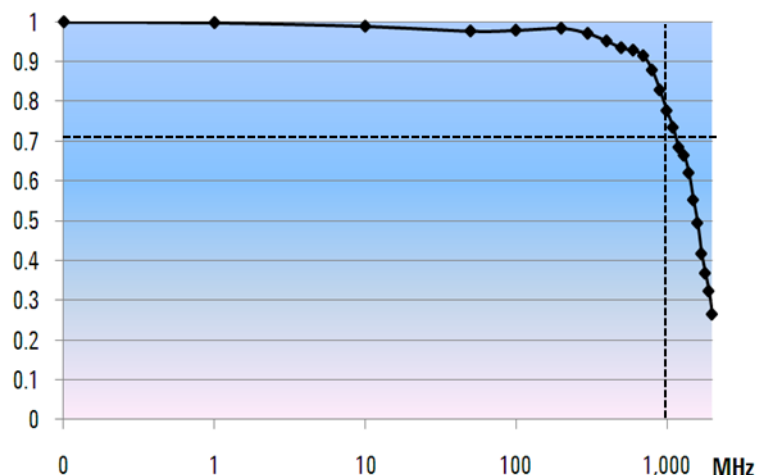


図52 Agilentの1 GHz帯域幅のオシロスコープの実際の周波数応答

デジタル・アプリケーションに必要な帯域幅

今日の電子工学部の卒業生のほとんどは、エレクトロニクス業界に入れば、デジタル設計アプリケーションに専念することになります。また、数ギガビット/sレンジのデジタル・クロック・レートとシリアル・データ・リンクは、今日ではごく一般的です。

経験則

経験則として、オシロスコープの帯域幅は、被試験システムの最高速のデジタル・クロック・レートより5倍以上高くなければなりません。オシロスコープがこの仕様を満たしていれば、最小限の信号減衰で5次高調波まで捕捉できます。信号のこの成分は、デジタル信号全体の形状を決定するのに非常に重要です。

$$f_{BW} \geq 5 \times f_{clk}$$

ただし、急峻なエッジを正確に測定する必要がある場合は、この簡単な計算式では、急峻な立ち上がり／立ち下がりエッジに実際に含まれている高周波成分を考慮することはできません。

ステップ1：実際の最高速のエッジ速度の測定

必要なオシロスコープ帯域幅を決定するためのより正確な方法は、デジタル信号に存在する最大周波数（最高クロック・レートではありません）を求めることです。最大周波数は、デザイン内の最高速のエッジ速度に基づいたものです。このため、最初にすべきことは、最高速信号の立ち上がり／立ち下がり時間を測定することです。この情報は、通常はデザインに使用するデバイスの公開されている仕様から入手できます。

ステップ2： f_{knee} の計算

簡単な計算式を使って、最大「実用」周波数成分を計算することができます。Dr. Howard W. Johnsonは、これをテーマにした、“*High-speed Digital Design - A Handbook of Black Magic*”¹という本を書いています。同氏は、この周波数成分を「ニー」周波数（ f_{knee} ）と呼んでいます。すべての急峻なエッジが無数の周波数成分を含んでいますが、急峻なエッジの周波数スペクトラムには変曲点（“knee”）が存在し、信号形状を決定する上で f_{knee} より高い周波数成分が重要ではなくなります。

$$f_{knee} = 0.5/RT \text{ (10 \% \sim 90 \%)}$$

$$f_{knee} = 0.4/RT \text{ (20 \% \sim 80 \%)}$$

10%～90%のしきい値に基づいた立ち上がり時間特性を持つ信号の場合は、 f_{knee} は0.5を信号の立ち上がり時間で割った値になります。20%～80%のしきい値に基づいた立ち上がり時間特性を持つ信号の場合（今日のデバイス仕様の多くで非常に一般的）は、 f_{knee} は0.4を信号の立ち上がり時間で割った値になります。これらの立ち上がり時間とオシロスコープの仕様立ち上がり時間を混同しないでください。今は、実際の信号のエッジ速度について説明しています。

ステップ3：オシロスコープ帯域幅の計算

3番目のステップは、この信号の測定に必要なオシロスコープ帯域幅を、立ち上がり／立ち下がり時間を測定する場合に必要な確度に基づいて決定することです。表2に、ガウシアン周波数応答を持つオシロスコープのさまざまな確度に対する倍率を示します。

表2 必要なオシロスコープ帯域幅を必要な確度に基づいて計算するための倍率

必要な確度	必要な帯域幅
20%	$f_{BW} = 1.0 \times f_{knee}$
10%	$f_{BW} = 1.3 \times f_{knee}$
3%	$f_{BW} = 1.9 \times f_{knee}$

例

今度は、簡単な例を手順を追って説明します。

1 ns の立ち上がり時間 (10 ~ 90 %) を測定するために、近似的にガウシアン周波数応答を持つオシロスコープの必要最小帯域幅を決定します

信号の概算立ち上がり／立ち下がり時間が1 nsの場合 (10 %~90 %基準で) は、信号内に存在する最大実用周波数成分 (f_{knee}) は約500 MHzになります。

$$f_{knee} = 0.5 / 1 \text{ ns} = 500 \text{ MHz}$$

信号の立ち上がり／立ち下がり時間のパラメトリック測定で、最大20 %のタイミング誤差を許容できる場合は、デジタル測定アプリケーションに500 MHz帯域幅オシロスコープを使用できます。ただし、3 %の範囲のタイミング確度が必要な場合は、1 GHz帯域幅のオシロスコープの方が適しています。

20%のタイミング確度：
オシロスコープ帯域幅 = $1.0 \times 500 \text{ MHz} = 500 \text{ MHz}$

3%のタイミング確度：
オシロスコープ帯域幅 = $1.9 \times 500 \text{ MHz} = 950 \text{ MHz}$

次に、さまざまな帯域幅のオシロスコープを使って、この例と類似する特性を持つデジタル・クロック信号をいくつか測定します。

デジタル・クロック測定の比較

図53は、100 MHz帯域幅のオシロスコープを使用して、高速なエッジ速度を持つ100 MHzのデジタル・クロック信号を測定した場合の波形結果を示したものです。ご覧のように、このオシロスコープは主にこのクロック信号の100 MHzの基本波をパス・スルーするだけなので、クロック信号は近似正弦波のように表示されます。100 MHzのオシロスコープは、10 MHz～20 MHzの範囲のクロック・レートを持つ多くの8ビットMCUベースのデザインに最適なソリューションですが、100 MHzの帯域幅では、この100 MHzのデジタル・クロック信号には明らかに不十分です。

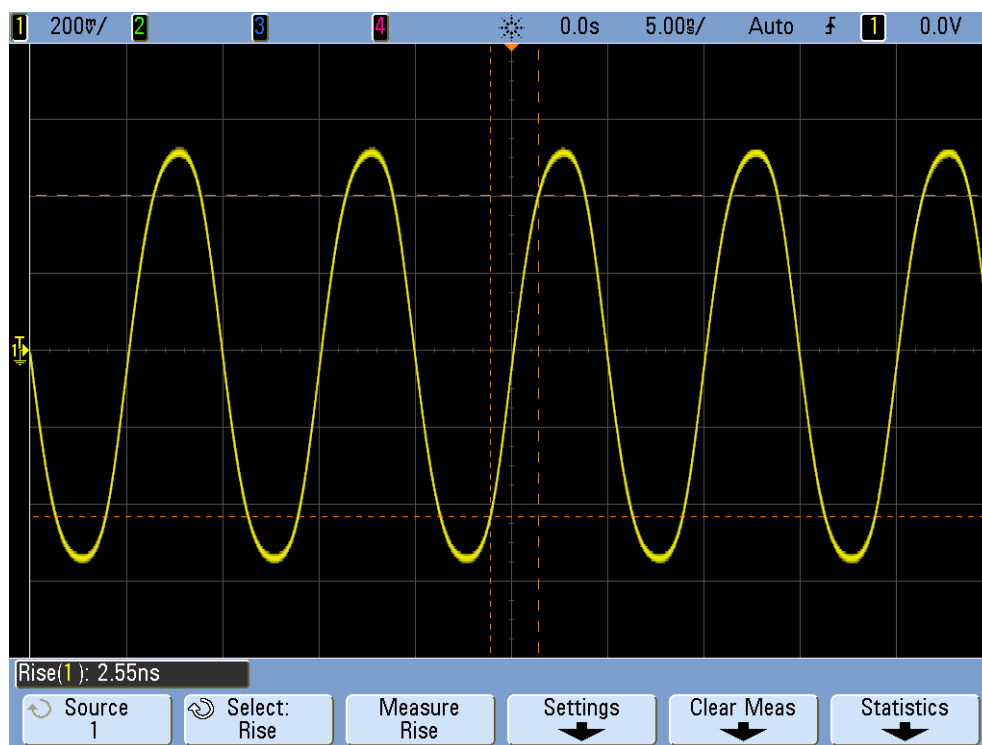


図53 100 MHz帯域幅のオシロスコープで捕捉された100 MHzデジタル・クロック信号

500 MHz帯域幅のオシロスコープを使用した場合は、[図54](#)からもわかるように、最初の経験則どおりに、5次高調波までを捕捉できます。ただし、オシロスコープの立ち上がり時間の測定値は約750 psになっています。この場合、オシロスコープは、この信号の立ち上がり時間をそれほど正確に測定していません。オシロスコープは実際には、500 psに近い入力信号の立ち上がり時間ではなく、オシロスコープの立ち上がり時間に近い（700 ps）ものを測定しています。タイミング測定が重要な場合は、このデジタル測定アプリケーションには広帯域オシロスコープが必要です。

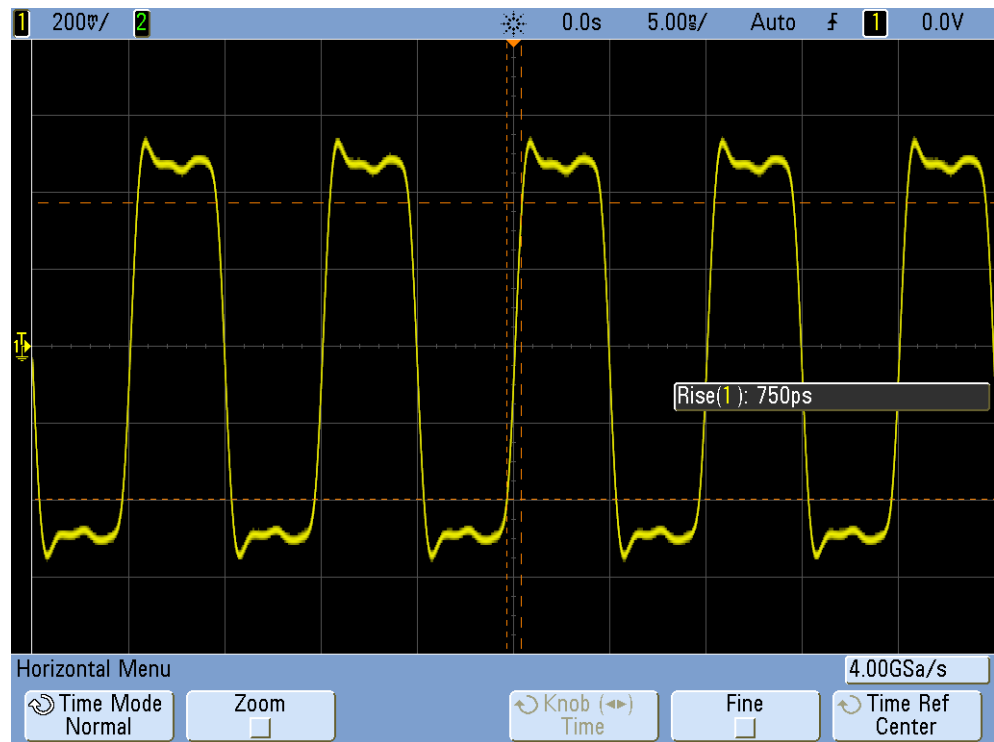


図54 500 MHz帯域幅のオシロスコープで捕捉された100 MHzデジタル・クロック信号

1 GHz帯域幅のオシロスコープを使ってこの100 MHzのデジタル・クロックを捕捉した場合は、この信号のさらに正確な画像が得られます（[図55](#)を参照）。より高速の立ち上がり／立ち下がり時間を測定したり、より少ないオーバーシュートをモニタしたり、より狭い帯域幅のオシロスコープでは無視されたわずかな反射もモニタすることができます。

B オシロスコープの帯域幅に関するチュートリアル

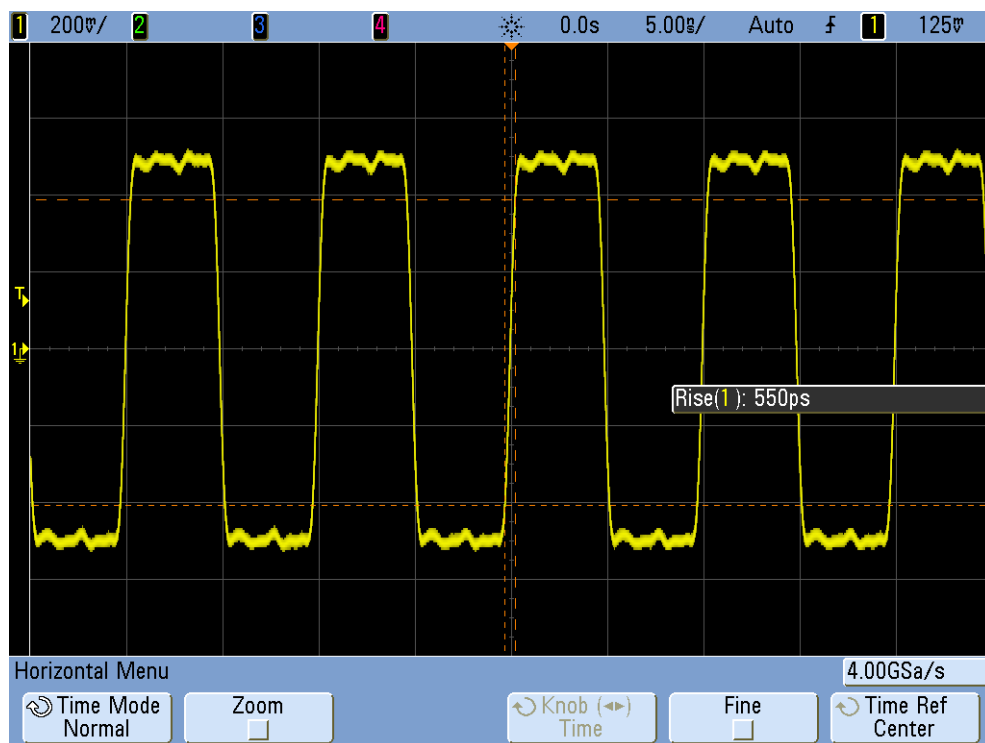


図55 1 GHz帯域幅のオシロスコープで捕捉された100 MHzデジタル・クロック信号

このオシロスコープの帯域幅に関するチュートリアルでは、1 GHz以下の帯域幅を持つオシロスコープで、ガウシアン周波数応答を示すオシロスコープに重点を置いて説明しました。より広帯域のオシロスコープの多くは、急峻なロールオフ特性を持つ周波数応答を示します。このタイプの周波数応答では、帯域内周波数（-3 dBより下の周波数）は減衰が少ないのに対して、帯域外周波数（-3 dBより上の周波数）は大きく抑圧されます。理想の“brick-wall”フィルタを近似し始める、このタイプの周波数応答は、最大平坦周波数応答と呼ばれることもあります。これらの広帯域オシロスコープ (> 1 GHz) に対する必要なオシロスコープ帯域幅の計算式は、このチュートリアル/ガイドで紹介したものとは異なります。オシロスコープ帯域幅について詳細に学びたい場合は、Agilentのアプリケーション・ノート『アプリケーションに最適な帯域幅を持つオシロスコープの選択』（カタログ番号：5989-5733JAJP）をダウンロードできます。このカタログは、本書の「関連カタログ」に、ダウンロード方法とともに掲載されています。

¹ High-Speed Digital Design, A Handbook of Black Magic, Howard Johnson, Martin Graham, 1993, Prentice Hall PTD, Prentice-Hall, Inc, Upper Saddle River, New Jersey 07458

索引

数字

- 10:1パッシブ
電圧プローブ, 9
- 10:1パッシブ・プローブの
電気モデル, 9

A

- Auto Triggerモード, 25
- Averagingデータ収集モード, 30

D

- DSO, 7
- DSOXEDK, 3

F

- FFT演算機能, 73

M

- MSO, 7

N

- Normal Triggerモード, 25

P

- p-p電圧レベル, 19

あ

- アナログ・オシロスコープ, 7
- 位相シフト, 69, 71
- 位相遅延測定, 67
- オシロスコープ, 7
- オシロスコープ・プローブの接続, 8

か

- カーソル, 19
- 画像、保存, 32
- 画像の保存, 32
- カタログ、Agilentの関連, 84
- 基準波形データ・ファイル, 34
- 寄生容量, 37

- 基本波周波数, 74
- 教育用トレーニング・キット (DSOXEDK)
, 3
- 教授の皆さんへの注記, 4
- グリッチ・トリガ, 50
- ゲーテッド測定, 63
- 減衰比、プローブ, 10
- 高周波除去, 29
- 固有ノイズ容量, 37

さ

- 差動アクティブ・プローブ, 9
- 残光表示、無限, 51
- 自動増分, 33
- 自動トリガ, 24
- 自動パラメトリック測定, 57
- 周期, 18
- 周波数, 18
- 周波数ドメイン波形, 73
- 商標, 2
- シングルショット・イベント, 54
- シングルショットNormalトリガ・モード
, 54
- ズーム・タイムベース, 65
- 垂直コントロール, 11
- セグメント・メモリ, 78
- セグメント・メモリ収集モード, 81
- セットアップ、保存, 32
- セットアップの保存, 32
- 全スナップショット測定, 62
- 測定、自動パラメトリック, 57
- 測定しきい値レベル, 61
- 測定のしきい値レベル, 60
- ソフトキー, 12

た

- ダイナミック・レンジ, 10
- タイム・ドメイン波形, 73
- 立ち上がり時間測定, 60
- 立ち下がり時間測定, 60
- 遅延ノ位置, 23
- 遅延掃引タイムベース・モード, 65
- 注意事項, 2
- 調整、プローブ補正, 39

- デジタル・ストレージ・オシロスコープ
, 7
- デジタル・パルス・パラメータ測定, 60
- 電圧しきい値レベル, 60
- トリガ, 22
- トリガ・ヒステリシス, 30
- トリガ・ホールドオフ, 46
- トリガ・ポイント, 23
- トリガ・レベル・コントロールノブ, 12
- トリガ感度, 30

な

- ナイキストのサンプリング定理, 77
- 入力コントロール・ノブ, 13
- ノイズ除去, 30

は

- バースト, 46
- 波形、保存, 32
- 波形演算, 71
- 波形の演算, 71
- 波形の輝度レベル, 13
- 波形の最大値, 60
- 波形のトップ, 60
- 波形の保存, 32
- はじめに, 3
- パラメトリック測定、自動, 57
- パルス幅トリガ・モード, 50
- ピーク検出モード, 76
- ファンクション・ジェネレータ, 43
- 負荷キャパシタンス, 42
- プローブ減衰比, 10
- プローブの接続、オシロスコープ, 8
- プローブの負荷, 41
- プローブ補正, 38
- ホールドオフ、トリガ, 46
- 補正、プローブ, 37
- 補正キャパシタンス, 40
- 捕捉メモリ, 75

ま

- ミックスド・シグナル・オシロスコープ
, 7
- 無限残光表示, 51

索引

目盛りを数える, 20

ら

リサージュ曲線, 68